



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Herramientas de análisis en una bancada de pruebas para un micro turbojet

TITULACIÓN: Grau en Enginyeria d'Aeronavegació

AUTOR: Aleix Torra Raventós

DIRECTOR: Fernando Mellibovsky

FECHA: 18 / 05 / 2020

Título: Herramientas de análisis en una bancada de pruebas para un micro turbojet

Autor: Aleix Torra Raventós

Director: Fernando Pablo Mellibovsky Elstein

Fecha: 18 / 05 / 2020

Resumen

El objetivo de este trabajo se basa en el diseño de un sistema de medida complementario a una bancada de pruebas para un motor micro turbo jet (EvoJet B180 NEO). Se procederá a la definición y análisis del ciclo termodinámico de un motor micro turbo jet para así, efectuar el proceso de cálculo, selección e implementación de componentes para la correcta obtención de las variables termodinámicas en cada etapa de dicho motor. El diseño del sistema de medida empezará con el cálculo del ciclo de la máquina, de esta forma será posible prever las condiciones de trabajo de cada uno de los sensores. Seguidamente se procederá a la elección de los sensores que ira determinada principalmente, por la precisión que se necesite en cada etapa del motor. Las sondas instaladas se elegirán según el cálculo de propagación de incertidumbres para garantizar una óptima obtención de las actuaciones del motor. Finalmente, se realizará un estudio de instalación exhaustivo para cada tipo de sonda escogida para el sistema de medición.

Title: Analysis tools for a micro turbojet test rig

Author: Aleix Torra Raventós

Director: Fernando Pablo Mellibovsky Elstein

Date: 18 / 05 / 2020

Overview

The aim of this work is based on the design of a complementary measurement system for a micro turbo jet engine (EvoJet B180 NEO) test rig. The thermodynamic cycle of a micro turbo jet engine will be defined and analyzed in order to carry out the calculation, selection and implementation of components which will provide the thermodynamic variables in each stage of such engine. The design of the measurement system will start by computing the machine cycle, in this way it will be possible to forecast the working conditions of each sensor. Then, it will proceed to the choice of sensors that will be determined mainly by the precision needed at each stage of the engine. The installed probes will be chosen according to the calculation of propagation of uncertainties, this methodology will guarantee that the engine performances are obtained correctly. Finally, an exhaustive installation study will be carried out for each type of probe chosen for the measurement system.

ÍNDICE

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL MOTOR Y SU CICLO	2
1.1. Historia de los motores tipo jet.....	2
1.2. Motores tipo jet: principios de operación	3
1.3. Micro Turbojet.....	4
1.4. Análisis del ciclo	5
1.4.1. Ciclo de Brayton	5
1.5. Definición del ciclo termodinámico del EVOJET 180 neo	8
1.5.1. Compresor	8
1.5.2. Cámara de combustión.....	9
1.5.3. Turbina.....	9
1.6. Primera aproximación del ciclo termodinámico (gas calóricamente perfecto)	9
1.7. Análisis experimental del ciclo termodinámico	12
Capítulo 2. SENSORES	12
2.1. Tipología de los sensores utilizados	12
2.1.1. Sensores de temperatura	13
2.1.2. Sensores de presión.....	16
2.2. Elección de los sensores.....	16
2.2.1. Propagación de incertidumbres	17
2.3. Sensores de temperatura	21
2.3.1. Sensor T_2	21
2.3.2. Sensor T_3	22
2.3.3. Sensor T_4	23

2.3.4. Sensor <i>EGT</i>	25
2.3.5. Sensor <i>T5</i>	26
2.4. Sensores de presión	26
2.4.1. Sensor <i>P2</i>	27
2.4.2. Sensor <i>P3</i>	27
2.4.3. Sensor <i>P4</i>	28
2.4.4. Sensor <i>P5</i>	34
2.5. Colocación de los sensores	35
2.5.1. Sensores de temperatura	35
2.5.2. Sensores de presión.....	35
Capítulo 3. Acondicionamiento de señal	36
3.1. Termopares	37
3.1.1 Hardware	37
3.1.2. Software.....	38
3.2. RTDs	39
3.2.1 Hardware	39
3.3. Transductores de presión	40
3.3.1. Hardware	41
Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	47
APÉNDICE I: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MAX31855 EN UNA RASPBERRY PI.....	50
APÉNDICE II: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MAX31865 EN UNA RASPBERRY PI.....	53

APÉNDICE III: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MCP3428	
EN UNA RASPBERRY PI.....	56

Lista de figuras

Figura 1.1. Motor usado en el Aeolipile [1].....	2
Figura 1.2. Gráfico rendimiento propulsivo vs V_e / V_o	4
Figura 1.3. Turbojet de dimensiones reducidas [3]	4
Figura 1.4. Esquema de un turbojet [4]	5
Figura 1.5. Gráfico ideal temperatura vs Entropía	6
Figura 1.6. Gráfico real temperatura vs entropía	7
Figura 1.7. Esquema de colocación de sondas. [11]	12
Figura 2.1. Los tres tipos de terminación de un termopar. [13].....	14
Figura 2.2. Diagrama resistencia vs temperatura. [14]	15
Figura 2.3. Esquema de un transductor de presión. [15]	16
Figura 2.4. Gráfico milivoltios vs temperatura. [14]	24
Figura 2.5. Perfil de temperatura para un diámetro de 2mm	28
Figura 2.6. Esquema del intercambio de calor en elemento diferencial. [17]....	30
Figura 2.7. Perfil de temperaturas para un diámetro de 2mm.....	33
Figura 2.8. Perfil de temperaturas para un diámetro de 4mm.....	33
Figura 2.9. Perfil de temperatura para un diámetro de 4mm	34
Figura 2.10. Esquema colocación sonda de presión. [20]	36
Figura 3.1. Configuración de pines del MAX31855.[22].....	37
Figura 3.2. Aplicación usual del MAX31855. [22].....	38
Figura 3.3. Configuración de pines del MAX31865. [23].....	40
Figura 3.4. Esquema montaje de un variador de tensiones.....	41
Figura 3.5. Configuración de pines del BSS138. [24]	42
Figura 3.6. Configuración de pines del MCP3428. [25].....	43

Lista de tablas

Tabla 2.1. Características de los termopares más comunes. [12]	14
Tabla 2.2. Comparación características termopar/RTD	15
Tabla 2.3. Porcentajes de error de las diferentes sondas consideradas	20
Tabla 2.4. Propiedades termodinámicas del aire	32

Nomenclatura utilizada

F	Empuje
T	Temperatura
P	Presión
h	Entalpía
D	Diámetro
p	Perímetro
A	Área
g	Gravedad
β	Coeficiente de expansión térmica
ν	Viscosidad cinemática
ρ	Densidad
c	Calor específico
U	Velocidad del aire libre
Δ	Variación
∂	Derivada parcial
\dot{m}_o	Flujo de aire que el motor absorbe
\dot{m}_f	Flujo de combustible que se le suministra a la cámara de combustible
V_e	Velocidad de salida de los gases en la tobera del motor
V_0	Velocidad de vuelo
η_{pr}	Eficiencia propulsiva
P_F	Potencia de empuje
P_T	Potencia total
α	Ratio combustible/aire
w	Trabajo
η_{th}	Rendimiento térmico del sistema
q_{out}	Calor cedido
q_{in}	Calor absorbido
Δh	Variación de entalpía
h_{LV}	Capacidad calorífica de un combustible
ε	Perdidas de carga
ε_i	Perdidas de admisión
ε_b	Perdidas de combustión
ε_n	Perdidas de la tobera
π_c	Ratio de compresión
π_t	Ratio de expansión
γ	Constante adiabática
η_{cp}	Eficiencia politrópica del compresor
η_{tp}	Eficiencia politrópica de la turbina
η_b	Eficiencia de la cámara de combustión
η_{mec}	Eficiencia mecánica
ψ	Empuje específico
k	Conductividad térmica
Nu	Numero de Nusselt
Ra	Numero de Rayleigh
Pr	Numero de Prandtl

Introducción

Los motores de reacción son el principal método de propulsión con el cual la mayoría de aeronaves de transporte de pasajeros y/o mercancías están habilitadas. De igual forma, este tipo de motor también se encuentra en la aviación militar, dónde la tipología de motor de reacción utilizada varía en función de las necesidades y las prestaciones que se necesiten para la aeronave a la que dará servicio. Este tipo de motores permite impulsar de manera efectiva la mayoría de los aviones que operan bajo la tropopausa, disminuyendo su eficacia en alturas mayores a causa de la baja proporción de oxígeno en dichas altitudes. Los motores de reacción se basan en la descarga de un chorro a grandes velocidades el cual genera un empuje de reacción. Los motores tipo jet, se definen básicamente como una turbina de gas que a partir del aire absorbido y el combustible quemado transforma la energía que contienen en un potente chorro capaz de propulsar grandes artefactos.

Con el fin de analizar el funcionamiento de dichas máquinas térmicas, en este proyecto se procederá a examinar el ciclo termodinámico de un turbojet de dimensiones reducidas. Este análisis se compondría básicamente de dos partes que deberían coincidir.

Por una parte, se hablará de un estudio breve del ciclo termodinámico del motor para poder estimar de manera aproximada los valores de las variables termodinámicas que se dan en las diferentes etapas de la máquina. Una vez conocidos dichos valores, será posible realizar una exhaustiva búsqueda de diferentes tipos de sensores que serían capaces de operar en los ambientes hostiles que se dan en el interior de la máquina, a la vez que serían capaces de medir de manera real los valores de las variables termodinámicas que previamente se habrían calculado. Este estudio de sensores no solo se va a limitar a comprobar la capacidad de funcionamiento que tienen, sino que también estudiará la instalación de los mismos y su acondicionamiento electrónico para poder leer el valor que las sondas proporcionan.

La segunda parte, se compondría de la medición práctica de las variables termodinámicas comentadas previamente a partir de los sensores estudiados en la parte teórica. Este proceso incluiría la instalación de las sondas y la instalación del acondicionamiento electrónico, como los diferentes chips que requeriría cada sensor para permitir la correcta comunicación de estos con el microcontrolador central encargado de proporcionar los datos leídos.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL MOTOR Y SU CICLO

1.1. Historia de los motores tipo jet

Los motores tipo jet pueden definirse como un tipo de motor que proporciona su propulsión por escape de gas, generando una fuerza opuesta a la del sentido de expulsión de los gases.

El primer motor tipo jet data del 250 AC, cuando este se uso en el Aeolipile, este motor estaba formado por una esfera con dos toberas la cual estaba soportada por una base que se calentaba por su parte inferior. Este soporte contenía un fluido que aumentaba su temperatura y subía hasta ser expulsado a presión por las toberas contenidas en la esfera.



Figura 1.1. Motor usado en el Aeolipile [1]

No obstante, el primer motor de reacción patentado fue creado por el ingeniero inglés Sir Frank Whittle en los años 30, el cual demostró las capacidades de este tipo de motor para efectuar una conversión de energía de manera óptima. Al cabo de unos pocos años, el alemán Hans von Ohain diseñó el HeS 3, un motor que fue capaz de propulsar el primer avión a reacción de la historia, el Heinkel HE-178 [2].

La idea surgió de la necesidad de solventar uno de los principales problemas de los motores de aviación de esa época, la baja velocidad que los motores de hélice eran capaces de generar. Los aviones equipados con ese tipo de motores volaban a una velocidad cercana a la del sonido pero no eran capaces de romper las ondas de choque que suponía volar a esa velocidad.

Los motores a reacción permitieron una combustión continua del combustible junto un flujo de aire constante, de esta forma, empezaron a substituir los motores de pistón usados hasta entonces en la industria aeronáutica. Al mismo tiempo, el mayor desafío con el que luchaban los ingenieros era encontrar un material que soportase las elevadas temperaturas que se alcanzaban en las cámaras de combustión de dichos motores. Todo el desarrollo de esta tecnología tuvo lugar en medio de la segunda guerra mundial, dónde se lograron grandes avances a causa de la necesidad de encontrar soluciones para hacerse de algún tipo de ventaja.

1.2. Motores tipo jet: principios de operación

Tal y como su nombre indica, podemos deducir que estos motores se rigen por la 3ª ley de Newton, la cual nos dice que si se aplica fuerza sobre un cuerpo, este nos produce una fuerza de igual magnitud pero en sentido contrario. De igual forma, sabemos que esta fuerza es igual a un cambio en el momento total, de este modo el impulso neto generado lo podemos expresar como una relación entre la velocidad en que el flujo entra en el motor y la velocidad en que este sale del mismo motor:

$$F = (\dot{m}_o + \dot{m}_f)V_e - \dot{m}_o V_0 \quad (1.1)$$

Dónde

\dot{m}_o es el flujo de aire que el motor absorbe

\dot{m}_f es el flujo de combustible que se le subministra a la cámara de combustible

V_e es la velocidad de salida de los gases en la tobera del motor

V_0 es la velocidad de vuelo

Una vez dicha en la ecuación (1.1) como se rige el impulso de cualquier motor a reacción podemos cualificar que tan efectivo es este motor. Para medir la eficiencia de propulsión se tendrá que determinar la relación que hay entre la potencia de empuje del motor con su potencia total.

$$\eta_{pr} = \frac{P_F}{P_T} = 2 \frac{\left(\frac{V_e}{V_0} - 1\right) + \alpha \frac{V_e}{V_0}}{\left[\left(\frac{V_e}{V_0}\right)^2 - 1\right] + \alpha \left[\left(\frac{V_e}{V_0}\right)^2 - 1\right]} \quad (1.2)$$

Donde α es el ratio combustible/aire

Si hacemos la suposición que contamos con un *pure propeller*, ya que la cantidad de aire que entra en el motor es mucho más grande que la cantidad de combustible que entra, podemos asumir que $\alpha \rightarrow 0$, de esta forma la ecuación (1.2) nos queda de la siguiente manera:

$$\eta_{pr} = \frac{P_F}{P_T} = \frac{2}{1 + \frac{V_e}{V_0}} \quad (1.3)$$

Con esta expresión, podemos ver que el rendimiento propulsivo del motor aumenta a medida que el valor de la velocidad de entrada del flujo se aproxima al valor de la velocidad de salida de los gases.

En la figura 1.2, se observa que el rendimiento propulsivo disminuye exponencialmente con el decrecimiento de la relación velocidad de salida / velocidad de entrada.

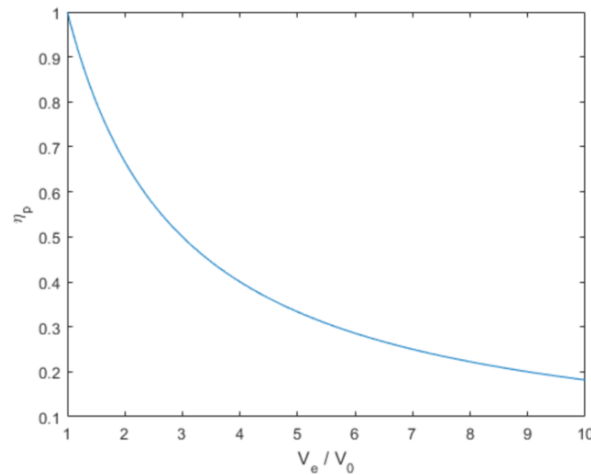


Figura 1.2. Gráfico rendimiento propulsivo vs V_e / V_0

1.3. Micro Turbojet

Un micro turbojet como el de la figura 1.3, es un tipo de turbina de gas que funciona a partir de una combustión continua e interna. Este tipo de motor se rige por el ciclo de Brayton y esta formado por un compresor centrífugo aguas arriba del motor, un difusor radial que canaliza el flujo de aire hacia una cámara de combustión anular, una turbina axial y una tobera convergente aguas abajo del motor. Como su nombre indica esta máquina es básicamente un motor turbojet de dimensiones reducidas y es por esto que contiene un solo eje rotatorio que recupera la energía necesaria para poder realizar la compresión del flujo. Este tipo de turbojets tiene una eficiencia térmica de entre el 10% i el 30%, una potencia de 15 kW hasta 200 kW, un empuje que puede alcanzar más de los 200 N y una velocidad de rotación del eje que se sitúa entre los 20.000 y 150.000 rpm [3].

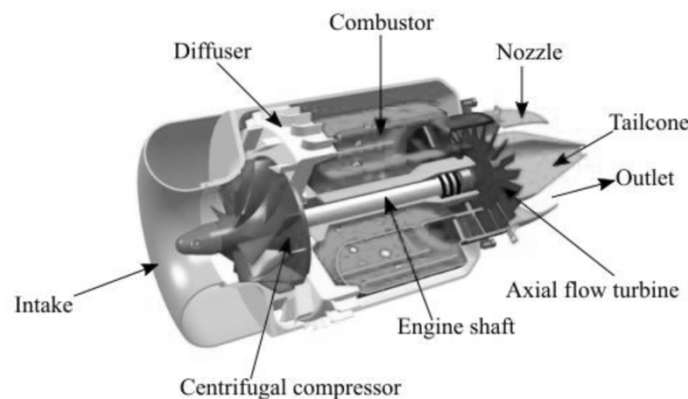


Figura 1.3. Turbojet de dimensiones reducidas [3]

Un motor de estas dimensiones se comporta termodinámicamente igual que cualquier turbina de gas, las cuales ingieren una cantidad determinada de flujo de aire para tratarlo y efectuarle procesos térmicos que siguen el modelo del ciclo de Brayton.

1.4. Análisis del ciclo

1.4.1. Ciclo de Brayton

Como cualquier máquina térmica, los motores que funcionan con turbina de gas siguen un ciclo termodinámico y en su caso, es el ciclo de Brayton. Los motores de reacción como el micro turbojet basan su funcionamiento en una conversión de calor hacia una energía útil que se convertirá en empuje. De esta forma, el ciclo se determina por un intercambio de calor y energía entre el motor y el entorno.

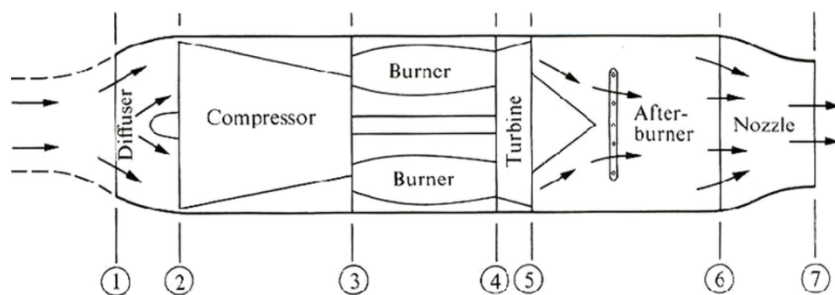


Figura 1.4. Esquema de un turbojet [4]

Para entender el ciclo, se va a tener en cuenta solo los elementos del motor que nos suponen un cambio termodinámico dentro del motor. Estos serían, el difusor, el compresor, la cámara de combustión, la turbina y la tobera de salida.

En la figura 1.4, se puede observar diferentes estaciones numeradas que se corresponden al estado del flujo en cada etapa del motor. La región entre la etapa uno y dos es el difusor, donde la corriente se ralentiza y la presión del aire aumenta. La región entre 2 y 3 es el compresor, donde se comprime el flujo añadiéndole así más energía, idealizado como un proceso adiabático donde la presión y la temperatura aumentan y el volumen disminuye. Entre las estaciones 3 y 4 se produce la combustión, se agrega calor y aumenta el volumen, la entropía y la temperatura alcanza su valor máximo. Entre las estaciones 4 y 5 se encuentra la turbina, donde la presión y la temperatura disminuyen y el volumen se expande isentropicamente mientras el aire fluye a través de la turbina, convirtiendo el calor en trabajo mecánico. Finalmente, entre 5 y 7, el aire pasa a través de la tobera disminuyendo su presión hasta la presión ambiental a la vez que aumenta la velocidad.

Los ciclos termodinámicos los podemos diferenciar entre los ideales y los reales, los ciclos ideales se calificarían como procesos perfectos que no tienen pérdida de energía, cuando esta se transforma o se maneja para su uso. Por otro lado, los ciclos reales son aquellos que si ocasionan pérdida de energía y son los únicos que rigen el comportamiento de cualquier máquina térmica.

Entonces, podemos encontrar la eficiencia de cualquier proceso, componente o máquina térmica comparando el comportamiento real de este con el comportamiento ideal.

1.4.1.1. Ciclo de Brayton ideal

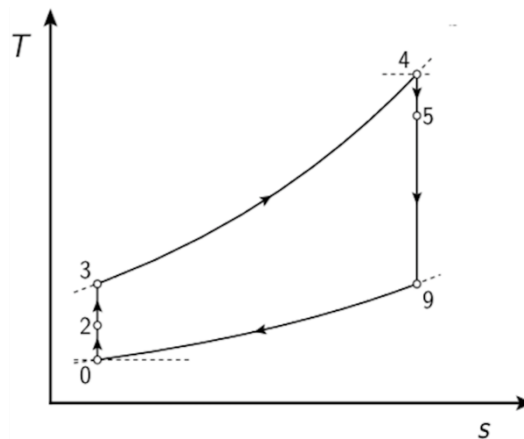


Figura 1.5. Gráfico ideal temperatura vs Entropía

- 0-3 Compresión adiabática del grupo compresor
- 3-4 Combustión isobárica
- 4-9 Expansión adiabática en la turbina
- 9-0 Expansión isobárica en la tobera

Como se puede observar en la figura 1.5, en las etapas de compresión y expansión del aire no tenemos ninguna transferencia de entropía, por lo tanto, el ciclo es eficientemente ideal. Con el gráfico anterior también podemos obtener el trabajo que generaría y el rendimiento que tendría nuestro motor si no experimentara pérdidas de ningún tipo, si el gas que circula a través de el fuera perfecto calóricamente y si la cantidad de flujo de combustible inyectada en el motor fuera despreciable.

$$w = C_p(T_3 - T_0) \left(\frac{T_4}{T_3} - 1 \right) \quad (1.2)$$

$$\eta_{th} = 1 + \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 + \frac{q_{90}}{q_{34}} \quad (1.3)$$

$$q_{out} = q_{90} = \Delta h_{90} = C_p(T_9 - T_0) \quad (1.4)$$

$$q_{in} = q_{34} = \Delta h_{34} = C_p(T_4 - T_3) \quad (1.5)$$

Dónde:

w es el trabajo generado por el sistema.

η_{th} es el rendimiento térmico del sistema.

q_{out} es el calor que el sistema libera.

q_{in} es el calor que entra en el sistema.

Δh es la variación de entalpía que hay entre los estados del subíndice.

1.4.1.2. Ciclo de Brayton real

Anteriormente se ha comentado el ciclo de Brayton ideal, un ciclo que era térmicamente perfecto y que no tenía pérdidas en ninguna fase, pero en la vida real no existe ningún sistema perfecto que nos pueda garantizar un rendimiento del 100%. En la siguiente gráfica podemos observar la forma que adquiere un sistema regido por el ciclo de Brayton real.

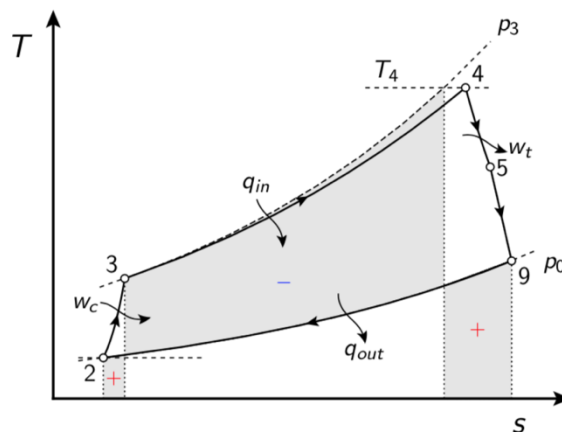


Figura 1.6. Gráfico real temperatura vs entropía

Tal y como se puede apreciar en la figura 1.6, la compresión y expansión que se llevan a cabo entre 2-3 y 4-9 respectivamente, no son energéticamente perfectas, es decir, en el proceso de compresión no todo el trabajo realizado hacia el flujo sirve para comprimirlo y en la turbina no toda la energía contenida en el flujo servirá para acelerar este mismo. Posteriormente, esto es debido a que ambos procesos no son ideales y por lo tanto tienen pérdidas tanto térmicas como mecánicas.

En este caso, no se puede asumir las hipótesis que se han tomado en ciclo de Brayton ideal, ya que el sistema no es calóricamente perfecto. Entonces, si en la figura 1.6 se considerara la adición del flujo de combustible, las relaciones obtenidas seguirían la siguiente forma:

$$W_S = -(q_{in} + q_{out}) \quad (1.6)$$

$$q_{in} = \int_3^4 T ds = (\dot{m}_0 + \dot{m}_f)h_4 - \dot{m}_0 h_3 \quad (1.7)$$

$$q_{out} = - \int_2^9 T ds = (\dot{m}_0 + \dot{m}_f)h_9 - \dot{m}_0 h_2 \quad (8)$$

$$\eta_{th} = 1 + \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 + \frac{q_{92}}{q_{34}} \quad (9)$$

Por otro lado, en el mismo gráfico se podría obtener la cantidad de pérdidas efectuadas en todo el ciclo, calculando el área sombreada que se encuentra por debajo de la línea que indica el proceso de liberación de calor (9-2).

1.5. Definición del ciclo termodinámico del EVOJET 180 neo

Para poder trabajar con este motor, es necesario conocer su ciclo termodinámico con el fin de determinar principalmente la temperatura y presión que se obtiene en cada fase del ciclo. Dicho motor se encuentra en tierra, está totalmente estático y se toman las condiciones de atmosfera estándar para realizar el estudio termodinámico.

El fabricante del micro turbojet EVOJET B220, proporciona algunas de las principales características del motor, como el empuje, el consumo, las revoluciones por minuto del eje principal y la temperatura de los gases de salida del motor [5]. Aún así, estos datos no son suficientes para obtener las variables termodinámicas que se encuentran en cada etapa del motor. Es por eso que se hace indispensable realizar un estudio bibliográfico de los elementos del motor para obtener sus prestaciones.

1.5.1. Compresor

Los compresores de las micro turbinas de gas suelen ser de tipo centrífugo por su capacidad de compresión ocupando un tamaño reducido. Se pueden dividir en dos componentes principales: el impulsor y los difusores. El impulsor aumenta la velocidad y la presión del flujo al cambiar la dirección del flujo de axial a radial. Luego, los difusores reducen la velocidad del flujo para aumentar la presión que entra en la cámara de combustión, lo que permite un proceso de combustión de alta eficiencia.

Los compresores centrífugos tienen una eficiencia politrópica alrededor del 75-85%, pero debido a la miniaturización de los componentes del motor, este valor no se mantiene y es por eso que se considerará una eficiencia politrópica del 75%. Por otro lado, el ratio de compresión que puede proporcionar un compresor

de estas prestaciones y dimensiones oscila alrededor del 3.5, dependiendo del tipo de paletas, el número de álabes y el ángulo de inclinación de estas. [6]

1.5.2. Cámara de combustión

Las micro turbinas de gas actuales utilizan una cámara de combustión que trabaja a presión. Son simples de implementar y proporcionan un flujo de gas relativamente estable y uniforme a la turbina. A pesar de que tienen beneficios prácticos, el comportamiento del flujo en la cámara de combustión es complejo debido a la compacidad y al entorno altamente viscoso. La eficiencia de la combustión, la estabilidad de la llama, el encendido, el enfriamiento de la pared, la pérdida de presión y el control de emisiones son algunos de los desafíos comunes que se enfrentan en el diseño y el rendimiento de estas cámaras de combustión.

Actualmente este tipo de cámaras de combustión tiene una eficiencia que esta entre el 95% i el 99% o análogamente unas perdidas de carga del 1%-5%, pero de la misma forma que en el compresor, se va a estimar unas pérdidas de carga (η_b) del 6% debido a la miniaturización.[7]

1.5.3. Turbina

La turbina se compone de rotor y estator, se ocupa de expandir los gases a presión sin variar considerablemente la velocidad para recuperar energía mecánica y transmitirla al eje que se encarga de accionar el compresor. La eficiencia termodinámica de la turbina depende de la manera en que se hace la conversión de la energía térmica a mecánica. Este elemento será el encargado de mover el compresor del motor utilizando el eje central por el que se unen. La eficiencia de dicha transmisión de movimiento se va a regir por la eficiencia mecánica de todo el conjunto motor, la cual en motores comunes oscila entre valores cercanos al 98% - 99%, en este caso se va a considerar del 97%. [8]

En cuanto al rendimiento politrópico de la turbina, se va a fijar a 0.85 ya que por cuestiones mecánicas la turbina suele alcanzar mayores valores que el compresor.

1.6. Primera aproximación del ciclo termodinámico (gas calóricamente perfecto)

La determinación aproximada del ciclo de la máquina, es de vital importancia para conocer el orden de magnitud de las temperaturas y presiones que se alcanzan en cada etapa del motor. De esta manera, se va a poder escoger adecuadamente el tipo de sensores que se van a necesitar, y con ellos, medir el ciclo termodinámico de una forma más precisa.

Para examinar la temperatura y presión en cada estación del motor, primero se va a tener que conocer dichos valores en las condiciones externas dónde se encuentra la máquina.

Durante todo el procedimiento se va a considerar el motor en el suelo y en condiciones estándar, por lo tanto, se va a partir de $T_0 = 288 \text{ K}$ y $P_0 = 101325 \text{ Pa}$.

En cuanto al consumo del motor, el fabricante indica un flujo de combustible máximo de 420 g/min para el EVOJET neo 180. Por otra parte, el flujo de aire no está indicado y se va a determinar a partir de un escalado utilizando datos conocidos de otro micro turbojet (JetCat P200-SX).[9]

Este segundo motor consume 584 g/min a la vez que proporciona un empuje de 230N, una velocidad de los gases de salida de 1840 km/h y alcanza un flujo de aire de 0.45 kg/s. Entonces, utilizando estos valores podemos estimar el flujo de aire del EVOJET 180 neo:

$$m_0 = 0.450 \cdot \frac{140}{230} = 0.274 \text{ kg/s} \quad (1.10)$$

En el caso del EVOJET se considera una velocidad de salida entorno a los 1200 km/h para cumplir con las especificaciones del motor, con esto podemos obtener una riqueza de la mezcla (α) de 0.0169.

Admisión:

Con la hipótesis de motor en tierra podemos suponer que $T_{t2} = T_{t0} = T_0 = 288 \text{ K}$

Tomando una eficiencia de admisión del 98%;

$$P_{t2} = P_{t0}(1 - \varepsilon_i) = 100.312 \text{ kPa} \quad (1.11)$$

Compresión

$$\pi_c = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} = 3.5 \rightarrow P_{T3} = 351.091 \text{ kPa} \quad (1.12)$$

$$\frac{P_{T3}}{P_{T2}} = \left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1} \eta_{cp}} \rightarrow T_{T3} = 464.15 \text{ K} \quad (1.13)$$

Combustión:

La combustión se realiza a partir de un combustible y estará determinada por el poder calorífico o su capacidad calorífica h_{LV} [10], que se define como la cantidad de energía que este proporciona por unidad de masa o de volumen de combustible que se desprende al producirse una reacción química o de reacción como sería la combustión del motor.

Partiendo de la ecuación de energía del quemador y considerando la relación aire -combustible del motor;

$$(1 + \alpha) \cdot h_{t4} = h_{t3} + \alpha \cdot \eta_b \cdot h_{LV} \quad (h_{LV} \approx 41 \text{ MJ}) \quad (1.14)$$

$$(1 + \alpha) \cdot C_p \cdot T_{t4} = C_p \cdot T_{t3} + \alpha \cdot \eta_b \cdot Q \quad (1.15)$$

$$T_{T4} = 1109.15 \text{ K}$$

Con una eficiencia de combustión del 94%;

$$P_{T4} = P_{T3}(1 - \varepsilon_b) = 330.026 \text{ kPa} \quad (1.16)$$

Descompresión:

Teniendo en cuenta solo las pérdidas mecánicas ($\eta_{mec} = 97\%$; $P = 0$) y resolviendo para los mínimos y máximos valores de las entalpías según su coeficiente de riqueza:

$$\dot{m}_0 \cdot (h_{t3} - h_{t2}) + P = \dot{m}_0 \cdot (1 + \alpha) \cdot (h_{t4} - h_{t5}) \cdot \eta_{mec} \quad (1.17)$$

$$T_{t3} - T_{t2} = (1 + \alpha)(T_{t4} - T_{t5}) \quad (1.18)$$

$$T_{T5} = 965.94 \text{ K}$$

Suponiendo una rendimiento politrópico de la turbina del 85%:

$$\frac{P_{t5}}{P_{t4}} = \left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{1}{\eta_{tp}}} \rightarrow P_{t5} = 147.53 \text{ kPa} \quad (1.19)$$

Expansión:

Asumiendo tobera adaptada ($P_7 = P_0$). Debido a la simplicidad de un motor como el microturbojet que se está considerando en este estudio, los valores de presión

y temperatura que se obtienen después de esta etapa se podrían considerar prácticamente iguales a los de la descompresión.

1.7. Análisis experimental del ciclo termodinámico

La necesidad de obtención de las variables termodinámicas se vuelve primordial cuando se desea calcular actuaciones del motor como el empuje, rendimientos de componentes, consumos, etc.

Para determinar con exactitud el valor de las variables termodinámicas que se alcanzan en cada etapa del motor, es preciso utilizar sensores de temperatura y presión en los lugares adecuados. Estos componentes van a diferir dependiendo del régimen de temperatura y presión que estén expuestos, es por eso que la elección de dichos sensores va estar determinada por el tipo de proceso que miden, el tamaño de la cavidad dónde se encuentran y la forma de medición.

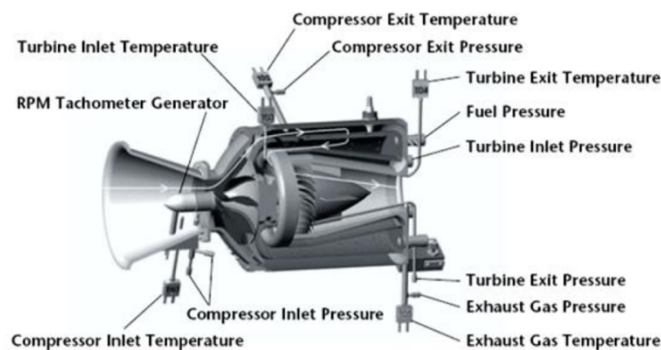


Figura 1.7. Esquema de colocación de sondas. [11]

Las localizaciones de los sensores de temperatura y presión se pueden apreciar en la figura 1.7, tal y como se indica en esta, se instalará un sensor de temperatura y otro de presión para cada inicio y final de etapa del ciclo termodinámico. Con el fin de eliminar confusiones, se va a seguir la numeración de etapas establecida previamente en el apartado del análisis del ciclo del motor.

Capítulo 2. SENSORES

2.1. Tipología de los sensores utilizados

Nomenclatura de los sensores

T_2 : Sensor de temperatura total en admisión.

T_3 : Sensor de temperatura total en la salida del compresor.

T_4 : Sensor de temperatura total en la entrada de la turbina.

T_5 : Sensor de temperatura total en la salida de la turbina.

T_7 : Sensor de temperatura total de los gases de escape.

P_2 : Sensor de presión total y estática de admisión.

P_3 : Sensor de presión total en la salida del compresor.

P_4 : Sensor de presión total en la entrada de la turbina.

P_5 : Sensor de presión total y estática en la salida de la turbina.

P_7 : Sensor de presión de los gases de escape.

FCS : Sensor de consumo de combustible.

Cabe aclarar que en la etapa 2 y 5 se van a utilizar dos sondas iguales para la medición de presión estática y presión total. La diferencia entre estas se dará en la colocación de las sondas respecto el flujo.

2.1.1. Sensores de temperatura

2.1.1.1. Termómetro de laboratorio

Sonda de medida de temperatura ordinaria utilizada para medir la temperatura ambiente en la que va operar el motor.

2.1.1.2. Termopar

Un termopar esta formado de dos alambres de diferentes metales unidos en un extremo, llamado unión de medición o unión caliente. En el otro extremo los materiales no permanecen en contacto, pero están conectados al circuito de acondicionamiento de señal. Esta unión entre los metales del termopar y las trazas del circuito se denominan unión de referencia o unión fría. Cuando hay un cambio de temperatura en la unión caliente, se produce una corriente continua que fluye en el circuito termoeléctrico. Si este circuito se rompe en el centro, el voltaje neto resultante en el circuito (el voltaje Seebeck), es una variable que depende de la temperatura a medir en la intersección de los alambres y del tipo de materiales que se usa. Entonces, cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce un voltaje que puede correlacionarse nuevamente con la temperatura.

Los termopares están disponibles con diferentes combinaciones de metales, conocidos como tipos o calibraciones. Los más comunes son los termopares de metal base conocidos como tipos K, J, T, E y N. También hay calibraciones de alta temperatura, también conocidas como termopares de metal noble: tipos R, S, C, D y B.

Cada tipo tiene un rango de temperatura, tolerancia y consideraciones ambientales diferentes. Aunque el tipo de termopar dicta el rango de temperatura, el rango máximo también puede estar limitado por el diámetro del cable del termopar. Es decir, un termopar muy delgado puede no alcanzar el rango de temperatura completo. Los

termopares tipo K se conocen como termopares de uso general debido a su bajo costo y amplio rango de medición de temperatura.

Thermocouple Type	Lead Metal A (+)	Lead Metal B (-)	Temperature Range (°C)	EMF over Temperature Range (mV)	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ at 0°C)
J	Iron	Constantan	-210 to 1200	-8.095 to 69.553	50.37
K	Chromel	Alumel	-270 to 1370	-6.458 to 54.886	39.48
T	Copper	Constantan	-200 to 400	-6.258 to 20.872	38.74
E	Chromel	Constantan	-270 to 1000	-9.385 to 76.373	58.70
S	Platinum and 10% Rhodium	Platinum	-50 to 1768	-0.236 to 18.693	10.19

Tabla 2.1. Características de los termopares más comunes. [12]

Sondas del termopar

Una de las características principales de un sensor del tipo termopar es la clase de sonda con la que mide la temperatura. Las más comunes son las sondas expuestas, sondas aterrizadas y las sondas aisladas. La elección de una u otra depende del tipo de fluido que se vaya a medir y de las condiciones de medición que se den.

- *Sonda expuesta.* Es el tipo de sonda con una respuesta más rápida, pero al estar expuesta al ambiente sólo se puede utilizar en situaciones dónde no intervengan medios corrosivos ni dónde no haya una elevada presión del fluido.
- *Sonda aislada.* Se caracteriza por estar envuelta de una cubierta protectora que le permite operar en ambientes más hostiles, pero a la vez ofrece una respuesta más limitada.
- *Sonda aterrizada.* Similar a la sonda aislada, se usa especialmente en situaciones dónde es preciso tener el termopar eléctricamente aislado.

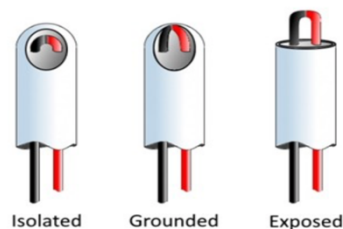


Figura 2.1. Los tres tipos de terminación de un termopar. [13]

2.1.1.3. RTD (detector de temperatura resistivo)

Los *RTD* son unas termoresistencias que funcionan como sensores de temperatura, basando su funcionamiento en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Cuando se calienta el metal conductor, se

aumenta la agitación térmica y consecuentemente la resistencia de dicho metal. Entonces, conociendo la resistencia del metal a una temperatura de referencia (0°C), podemos conocer la temperatura a medir a partir de la variación de la resistencia que se produce por medio de la ecuación (2.1).

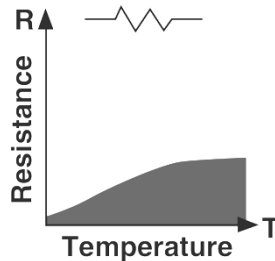


Figura 2.2. Diagrama resistencia vs temperatura. [14]

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2.1)$$

Dónde:

- R_0 Es la resistencia que se produce a la temperatura de referencia T_0
- ΔT Es la desviación de temperatura respecto T_0 , $\Delta T = T - T_0$
- α Es el coeficiente de temperatura del material conductor especificado a T_0

<i>Termopar</i>	<i>RTD</i>
No hay problemas resistivos con los cables conductores	Tiene más problemas resistivos y se calienta
Tiene una respuesta más rápida a los cambios de temperatura	Tiempo de respuesta lento
Muy simple, lo que lo hace barato	Caro
Puede operar en temperaturas muy elevadas	El rango de temperaturas de medición es más limitado, pero ofrece una mayor precisión
Mide temperatura en un punto concreto	Medición de temperatura por área
No es lineal	Más lineal que un termopar
Su salida se caracteriza por un voltaje muy reducido	Salida de tensión linealizada
Son de los sensores menos estables	Ofrece una buena estabilidad
No necesita una fuente de corriente para su operación	Se necesita una fuente de corriente
Fragilidad causada por la contaminación dependiendo de la sonda que se use	Resistente a la contaminación

Es de los sensores menos sensibles a pequeños cambios de temperatura	Baja sensibilidad a cambios pequeños de temperatura
--	---

Tabla 2.2. Comparación características termopar/RTD

2.1.2. Sensores de presión

2.1.2.1. Barómetro

Sensor de presión atmosférica ordinario para medir las condiciones ambientales en las que se encuentra el motor en operación.

2.1.2.2. Transductor de presión

Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, la conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone.

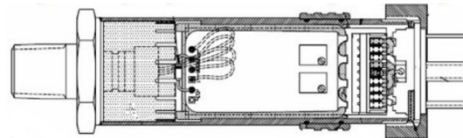


Figura 2.3. Esquema de un transductor de presión. [15]

La presión aplicada llega al transductor por el puerto o conexión de presión, situada a la parte izquierda de la figura 2.3, después de penetrar por el puerto se produce una deformación del diafragma proporcional a la magnitud de presión que llega por el puerto, dicha deformación se transmite a un sensor que se encarga de comunicar la señal a un circuito que amplifica y acondiciona la presión convirtiéndola en una señal de mV, V o mA.

2.2. Elección de los sensores

La implementación de aparatos de medición de temperatura y presión requiere un estudio de las diferentes especificaciones que rige dichos aparatos. Así se podrá implementar el que más convenga para las condiciones que se tienen cuando el motor está en funcionamiento.

Una de las principales características que se va a tener en cuenta, va a ser la precisión del sensor en el momento de medir la magnitud. Subestimar la precisión de los aparatos de medida podría dar resultados con errores muy elevados, de manera que podrían alejarse de lo que realmente está sucediendo

en las etapas del motor y darnos un resultado erróneo de las *performances* del motor.

Con el objetivo de conocer la precisión necesaria de cada sensor, se va a utilizar el método de propagación de incertidumbres, de esta manera se va a poder ver como afecta a la estimación de las *performances* del motor el computo global de errores en qué incurren los sensores instalados en el motor.

2.2.1. Propagación de incertidumbres

Para evaluar la propagación de los errores en las mediciones a los parámetros de *performances*, hay que tomar las expresiones para su cálculo en términos de cantidades mensurables (o previamente calculadas) y tomar la derivada de las primeras con respecto a las segundas. De este modo, se ha llegado a la estimación porcentual de los errores en parámetros derivados a partir de los errores en los parámetros de los cuales depende su cálculo.

- Rendimiento politrópico del compresor.

$$\eta_{cp} = \frac{\log \left(\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \right)}{\log \left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)} \cdot \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} = \left(\left| \frac{\partial \eta_{cp}}{\partial P_{t3}} \right| \cdot \Delta P_{t3} + \left| \frac{\partial \eta_{cp}}{\partial P_{t2}} \right| \cdot \Delta P_{t2} + \left| \frac{\partial \eta_{cp}}{\partial T_{t3}} \right| \cdot \Delta T_{t3} + \left| \frac{\partial \eta_{cp}}{\partial T_{t2}} \right| \cdot \Delta T_{t2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{cp}} \quad (2.3)$$

$$\frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} = \left| \frac{1}{\log \left(\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \right)} \right| \cdot \frac{\Delta P_{t3}}{P_{t3}} + \left| \frac{1}{\log \left(\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \right)} \right| \cdot \frac{\Delta P_{t2}}{P_{t2}} + \left| \frac{1}{\log \left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)} \right| \cdot \frac{\Delta T_{t3}}{T_{t3}} + \left| \frac{1}{\log \left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)} \right| \cdot \frac{\Delta T_{t2}}{T_{t2}} \quad (2.4)$$

- Rendimiento politrópico de la turbina.

$$\eta_{tp} = \frac{\log \left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}} \right)}{\log \left(\frac{P_{t5}}{P_{t4}} \right)} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} = \left(\left| \frac{\partial \eta_{tp}}{\partial T_{t5}} \right| \cdot \Delta T_{t5} + \left| \frac{\partial \eta_{tp}}{\partial T_{t4}} \right| \cdot \Delta P_{t2} + \left| \frac{\partial \eta_{tp}}{\partial P_{t5}} \right| \cdot \Delta P_{t5} + \left| \frac{\partial \eta_{tp}}{\partial P_{t4}} \right| \cdot \Delta P_{t4} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{tp}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\Delta\eta_{tp}}{\eta_{tp}} = \left| \frac{1}{\log\left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}}\right)} \right| \cdot \frac{\Delta T_{t5}}{T_{t5}} + \left| \frac{1}{\log\left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}}\right)} \right| \cdot \frac{\Delta T_{t4}}{T_{t4}} + \left| \frac{1}{\log\left(\frac{P_{t5}}{P_{t4}}\right)} \right| \cdot \frac{\Delta P_{t5}}{P_{t5}} + \left| \frac{1}{\log\left(\frac{P_{t5}}{P_{t4}}\right)} \right| \cdot \frac{\Delta P_{t4}}{P_{t4}} \quad (2.7)$$

- Ratio de compresión.

$$\pi_c = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta\pi_c}{\pi_c} = \left(\left| \frac{\partial\pi_c}{\partial P_{t3}} \right| \cdot \Delta P_{t3} + \left| \frac{\partial\pi_c}{\partial P_{t2}} \right| \cdot \Delta P_{t2} \right) \cdot \frac{1}{\pi_c} \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta\pi_c}{\pi_c} = \frac{\Delta P_{t3}}{P_{t3}} + \frac{\Delta P_{t2}}{P_{t2}} \quad (2.10)$$

- Ratio de expansión.

$$\pi_t = \frac{P_{t5}}{P_{t4}} \quad (2.11)$$

$$\frac{\Delta\pi_t}{\pi_t} = \left(\left| \frac{\partial\pi_t}{\partial P_{t5}} \right| \cdot \Delta P_{t5} + \left| \frac{\partial\pi_t}{\partial P_{t4}} \right| \cdot \Delta P_{t4} \right) \cdot \frac{1}{\pi_t} \quad (2.12)$$

$$\frac{\Delta\pi_t}{\pi_t} = \frac{\Delta P_{t5}}{P_{t5}} + \frac{\Delta P_{t4}}{P_{t4}} \quad (2.13)$$

- Empuje.

$$F = \dot{m}_o \cdot V_7 + \dot{m}_f \cdot V_7 \quad (2.14)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\left| \frac{\partial F}{\partial \dot{m}_o} \right| \cdot \Delta \dot{m}_o + \left| \frac{\partial F}{\partial V_7} \right| \cdot \Delta V_7 + \left| \frac{\partial F}{\partial \dot{m}_f} \right| \cdot \Delta \dot{m}_f \right) \cdot \frac{1}{F} \quad (2.15)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta \dot{m}_o}{\dot{m}_o + \dot{m}_f} + \frac{\Delta V_7}{V_7} + \frac{\Delta \dot{m}_f}{\dot{m}_o + \dot{m}_f} \quad (2.16)$$

- Empuje específico.

$$\psi = \frac{F}{\dot{m}_0} \quad (2.17)$$

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \left(\left| \frac{\partial \psi}{\partial F} \right| \cdot \Delta F + \left| \frac{\partial \psi}{\partial \dot{m}_0} \right| \cdot \Delta \dot{m}_0 \right) \cdot \frac{1}{\psi} \quad (2.18)$$

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta \dot{m}_0}{\dot{m}_0} \quad (2.19)$$

- Rendimiento térmico.

$$\eta_{th} = \frac{(1 + \alpha) \cdot V_9^2}{2 \cdot \alpha \cdot h_f} \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \left(\left| \frac{\partial \eta_{th}}{\partial \alpha} \right| \cdot \Delta \alpha + \left| \frac{\partial \eta_{th}}{\partial V_9} \right| \cdot \Delta V_9 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{th}} \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \frac{1}{\alpha + \alpha^2} + \frac{2}{V_9} \quad (2.22)$$

- Pérdidas de carga.

$$\varepsilon = \frac{P_{t,out} - P_{t,in}}{P_{t,out}} \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \left(\left| \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_{t,out}} \right| \cdot \Delta P_{t,out} + \left| \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_{t,in}} \right| \cdot \Delta P_{t,in} \right) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.24)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{P_{t,in}^2}{P_{t,out}^2 \cdot (P_{t,out} - P_{t,in})} + \frac{P_{t,in}}{P_{t,out} \cdot (P_{t,out} - P_{t,in})} \quad (2.25)$$

Uno de los parámetros que va a condicionar la elección del tipo de sensores que se va a implementar en el motor, es la precisión. Es de decir, el margen de error que se va a considerar en cada una de las lecturas que se efectúen. Con el objetivo de determinar la precisión aproximada que se necesitaría para realizar lecturas en el motor, se van a utilizar las propagaciones de incertidumbres que se acaban de calcular.

A partir de las ecuaciones (2.4) y (2.7) que rigen la propagación de incertidumbre para el rendimiento politrópico del compresor y el de la turbina respectivamente, se puede obtener una aproximación del valor de precisión que se necesitaría. Cabe decir que se escogen dichas ecuaciones, ya que en ellas están involucradas cada una de las variables termodinámicas que se van a leer a partir de los sensores ($P_{t2}, P_{t3}, P_{t4}, P_{t5}, T_{t2}, T_{t3}, T_{t4}, T_{t5}$).

Dicho esto, si se fija un valor de referencia para el error del rendimiento politrópico del compresor y de la turbina igual al 1%, obtenemos la manera en que interviene el error individual dentro de la expresión:

$$0.01 = 1.84 \cdot \varepsilon_{Pt3} + 1.84 \cdot \varepsilon_{Pt2} + 4.83 \cdot \varepsilon_{Tt3} + 4.83 \cdot \varepsilon_{Tt2} \quad (2.26)$$

$$0.01 = 2.86 \cdot \varepsilon_{Pt5} + 2.86 \cdot \varepsilon_{Pt4} + 13.57 \cdot \varepsilon_{Tt5} + 13.57 \cdot \varepsilon_{Tt4} \quad (2.27)$$

Con estas expresiones se puede apreciar que el error en las lecturas de temperatura, tendría que ser mucho más preciso que el error obtenido de las lecturas de presiones. Concretamente, para la expresión de error del rendimiento politrópico del compresor se obtiene que el error de temperatura y presión difieren en un factor igual a 2.63, lo cual significa que los sensores de temperatura tendrían que ser 2.63 veces más precisos que los de presión. En el caso del error del rendimiento politrópico de la turbina, difieren en un factor 4.74.

Con los factores resultantes mostrados en las ecuaciones (2.26) y (2.27), se podría estimar que las eficiencias del compresor y turbinas obtenidas en este análisis no podrán ser calculadas con una gran precisión. Esto se debe a la imposibilidad de encontrar sensores que contrarresten dichos factores.

Sensor	Estándar	Especial
Termopar	0.75%	0.4%
RTD	~1.37% (Clase B)	~0.56% (Clase A)
Transductor de presión	0.5%	0.25%

Tabla 2.3. Porcentajes de error de las diferentes sondas consideradas

En la tabla anterior, se puede ver el porcentaje de error que ocasiona cada uno de los tipos de sensores que se van implementar, recogiendo la versión estándar y otra especial con una precisión mayor.

Observando los valores de precisión agrupados en la tabla, se hace imposible cumplir los factores de relación entre el error de temperatura y presión que se necesitaría, ya que en cualquier caso el error que ofrece un sensor de presión es menor que el de un sensor de temperatura, ya sea un RTD o un termopar.

Dicho esto, se va a estimar la propagación de incertidumbres utilizando por un lado sensores estándar y por otros sensores especiales. Teniendo en cuenta que para el caso de los RTD se va a utilizar solo sensores del tipo clase A, ya que si se escogiera la otra tipología (clase B) la propagación de errores se dispararía por el hecho de tener un error de alrededor al 1.37%.

Si se estima la propagación de incertidumbres utilizando RTD de clase A y sensores estándar, se obtiene un error total del rendimiento politrópico del 8.17% y para el caso de la turbina se obtiene un error del 23.22%.

Por otro lado, utilizando sensores más precisos, los errores disminuyen alcanzando valores del 5.56% para el rendimiento politrópico del compresor y 12.26% para el rendimiento politrópico de la turbina.

2.3. Sensores de temperatura

2.3.1. Sensor T_2

El primer dispositivo de medición es el que dará las condiciones iniciales del aire que entra en el motor. En este análisis termodinámico, se considera que la temperatura a la entrada del compresor (temperatura de admisión) es la misma que la temperatura ambiente.

No estará instalado directamente en el motor, ya que se utilizará para medir la temperatura ambiente en la que el aire entra por el difusor. El hecho de que el motor permanezca quieto y en el suelo, permite medir la temperatura a las inmediaciones del motor, porque al no haber velocidad de entrada del flujo de aire, la temperatura ambiente es igual a la temperatura de admisión tal y como se ha dicho anteriormente.

Aunque el sensor no se instale en el motor ni las condiciones dónde actúe no sean adversas, se va a utilizar un RTD, concretamente un PT100. Es decir, un RTD que su material resistivo es el platino y su resistencia a la temperatura de 0° es de 100Ω. La razón de esta decisión es la necesidad de introducir sondas con mediciones precisas que sean lo más parecidas posibles. De esta manera, el acondicionamiento de señal que se tenga que diseñar para leer el valor de los sensores, podrá ser homogéneo para la mayoría de las sondas del motor y facilitara el análisis termodinámico de la turbina.

En las dos primeras fases del motor son las únicas en las que se va a utilizar este tipo de sensor. Aunque la temperatura que se espera en esta fase está comprendida dentro de los rangos de medición de los termopares, dicha temperatura es suficientemente baja para que un termopar no sea suficientemente estable ni preciso.

Características del sensor

- *Dimensiones.* En esta fase las dimensiones de la probeta no tendrán demasiada importancia ya que este sensor estará situado en el exterior del motor y el tamaño de la sonda no va a repercutir en el flujo que circula por el interior del motor.
- *Cubierta.* Se va a utilizar la misma cubierta utilizada en el sensor T_3 .
- *Terminación del cableado conductor.* Al estar sujeta al tipo de acondicionamiento de la señal que se utilice, es preciso utilizar la terminación con *spade lugs*.
- *Conectores.* Se van a utilizar tuercas roscadas para fijar los sensores al motor, de esta manera habrá la posibilidad de cambiar la sonda cuando esta falle o este inoperativa.
- *Coeficiente de temperatura.* El material resistivo del RTD es el platino, consecuentemente su coeficiente es de 0.00385. Debido a las necesidades de precisión se escogerá un RTD de clase A, con una desviación de lectura de temperatura que se registrará por: $\pm (0.15 + 0.002 \cdot |T|) ^\circ\text{C}$.

2.3.2. Sensor T_3

Este sensor será el encargado de medir la temperatura del aire, una vez este haya pasado por el compresor y haya experimentado la compresión. Por esta razón, irá instalado entre la salida del compresor y la entrada de la cámara de combustión.

Para cubrir las necesidades que se dan en esta aplicación, también se va a usar un RTD PT100.

Cómo se ha explicado en el sensor T_2 , la utilización de termopares en esta fase no garantiza precisión ni estabilidad debido a los rangos de temperaturas que se esperan.

Características del sensor

- *Dimensiones.* El diámetro de la probeta del RTD será el menor posible, cuanto más pequeña sea la probeta que penetra en el motor y se inmersa en el fluido interior menor será la perturbación que este cause sobre dicho

flujo, entonces el diámetro será de 0.32 cm. En cuanto la longitud de la probeta, no tendrá repercusión en el flujo interior del motor, pero es recomendable que sea lo suficientemente larga para alejar el cableado de la elevada temperatura que existirá en las inmediaciones del motor. Para esto, una longitud de 15 cm será suficiente.

- *Cubierta.* Rígida y sellada con epoxy para proteger el sensor de la humedad y la corrosión, construida de acero inoxidable 316 y capaz de soportar temperaturas comprendidas entre -50°C y 260°C. La resistencia térmica del sensor hace que un RTD solo sea utilizable antes de la etapa de combustión del motor.
- *Terminación del cableado conductor.* *Spade lugs.*
- *Conectores.* *Tuercas roscadas.*
- *Coeficiente de temperatura.* RTD de clase A para aumentar la precisión del sistema e intentar disminuir el error cometido en el calculo de las *performances* del motor.

2.3.3. Sensor T_4

Colocado a continuación de la cámara de combustión, justo antes de la turbina de expansión. Este sensor será el que se someterá a las temperaturas más elevadas de todo el ciclo, es por eso que la probeta del sensor tendrá que ser capaz de soportar temperaturas de alrededor a los 900°C.

Dadas estas condiciones, una de las mejores opciones es la utilización de termopares gracias a su capacidad para soportar altas temperaturas y sus reducidas dimensiones. Dentro de la larga variedad de termopares que existen en el mercado, se encuentra una tecnología que se usa específicamente para turbinas, motores de aviones, quemadores, etc. [16] Este tipo de termopares son los que utilizan un aislado mineral en la cubierta. El aislamiento hace que el sensor aumente su tiempo de respuesta, ya que es posible utilizar un diámetro más reducido de los conductores del termopar. El aislado se basa en una mezcla compacta de MgO que incrementa la capacidad de leer la temperatura transfiriendo el calor rápidamente hacia la junta de medición o unión caliente.

Por otra parte, un termopar que esta dotado de aislamiento mineral es capaz de soportar temperaturas y presiones más elevadas que un termopar convencional. A demás, aporta una protección extra contra la humedad y el choque térmico.

Características del sensor

- *Dimensiones.* Para los termopares hay disponible un diámetro menor que en los RTD, pero para facilitar el proceso de montaje se va a utilizar el mismo diámetro que en la sonda anterior, 0.32cm. De esta forma la perturbación que este generará al flujo será de misma magnitud. La

longitud de la probeta del termopar también será suficiente con unos 15cm.

- *Cubierta.* Aislamiento mineral tal y como se ha comentado anteriormente, reforzada con un sellado de epoxy para prevenir la penetración de la humedad en el cableado interior.
- *Terminación del cableado conductor. Spade lugs.*
- *Conectores. Tuercas roscadas.*
- *Calibración.* Una optima calibración para la aplicación que se le va a dar es la K. Cabe decir que no es la única calibración que se podría utilizar, pero este tipo de calibración ofrece un amplio abanico de utilización en diferentes temperaturas y se ha elegido mediante los criterios expuestos a continuación.

A la hora de escoger la calibración del termopar si se estudia el rango de temperaturas operacional de cada una de las calibraciones, se puede observar que la mayoría de termopares serían capaces de soportar las temperaturas de salida que se darán en la cámara de combustión de la microturbina. Después de descartar las calibraciones que no operan esas temperaturas, el factor decisivo se encuentra en el orden de magnitud de milivoltios que estas ofrecen una vez se obtienen las lecturas del termopar.

La figura 2.4 muestra para cada calibración, la salida aproximada que nos daría el termopar según la temperatura que se estuviera leyendo.

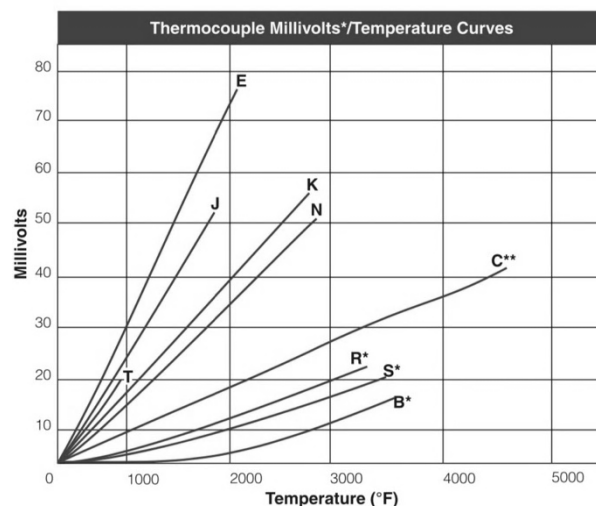


Figura 2.4. Gráfico milivoltios vs temperatura. [14]

Tal y como se puede apreciar en el gráfico, las calibraciones capaces de soportar valores cercanos a 1000°C (1832°F) serían las E, K, N, C, R, S y B descartando la J por encontrarse en el límite. Teniendo en cuenta

estas calibraciones, las 4 últimas ofrecen una respuesta notablemente inferior, consecuentemente supondría disponer de un acondicionamiento de la señal más precisa para detectar valores de milivoltios inferiores.

Entonces, de entre las calibraciones restantes, la que ofrece mayor respuesta de salida es la E, aunque se va a escoger la K ya que es el tipo de calibración más versátil que existe entre las tres.

- *Precisión.* Como se ha visto anteriormente en la ecuación (2.27), los sensores de temperatura correspondientes a las fases T_{t4} y T_{t5} deberían ser las sondas provistas de una mayor precisión ya que su impacto en la propagación es mucho mayor. Por esta razón la necesidad de implementar una sonda con límite de error de precisión de categoría especial ($\pm 0.4\%$) se hace indispensable.

2.3.4. Sensor EGT

El sensor encargado de proporcionar el valor de la temperatura de los gases de salida es una sonda que ya viene de serie incorporada en el motor y esta ubicada justo después de la turbina. Este sensor incorpora también su instalación directa con la centralita de procesamiento de datos del motor (*JETRONIC control*), la cual se encarga de efectuar el acondicionamiento del señal proporcionado por la sonda de temperatura.

Haciendo referencia a las instrucciones indicadas por el fabricante, la probeta de EGT deberá leer valores de entre 600°C y 780°C en circunstancias normales de funcionamiento. Cuando se sobrepasa estos valores, la capacidad de control de la turbina disminuye y esta se pierde si la temperatura asciende por encima a los 790°C. El valor máximo que esta sonda debería leer oscila alrededor de los 840°C y se daría única y exclusivamente en efectuar una interrupción de seguridad durante el arranque del motor.

Las especificaciones exactas de la sonda instalada en el motor no son facilitadas por el fabricante, por esta razón se determinarán a partir de las especificaciones facilitadas por otro fabricante que manufactura turbinas muy similares a la utilizada en este estudio.

- *Dimensiones.* El diámetro de la sonda es de 0.32cm y la longitud de esta es inapreciable ya que esta instalada directamente en el interior del motor.
- *Cubierta.* Construida de Inconel 600 con un espesor aproximado de 0.38mm, esta probeta también cuenta con aislamiento mineral con MgO.
- *Terminación.* La sonda va directamente conectada al sistema electrónico *JETRONIC*.
- *Conectores.* Al estar instalada en el interior del motor no se puede determinar la fijación de la probeta en la carcasa de este.

- La probeta de la sonda es un termopar tipo K, capaz de leer temperaturas de -100°C hasta 1300°C.
- *Precisión.* Este sensor es una sonda de precisión especial, con unos límites de error de precisión en la lectura de temperatura no superiores a +/- 0.4%.

2.3.5. Sensor T_5

Esta sonda corresponde al elemento encargado de medir la temperatura de los gases de salida. El motor que se utiliza ya incorpora una sonda para monitorizar los gases de expulsión, pero debido a la instalación de sensores que se va a realizar no supone un gasto demasiado grande la incorporación de otro sensor adicional al de fabrica. Esta sonda complementaria permitirá estimar la efectividad del sensor instalado de fabrica y tomar valores con una precisión más elevada.

Los rangos de temperatura y las condiciones ambientales que se encuentran en esta fase, no divergen demasiado a las encontradas en la fase de la cámara de combustión y esto lleva a incorporar una sonda con las mismas características a la instalada en T_4 .

2.4. Sensores de presión

Para la medición de la presión se va a utilizar los mismos transductores de presión en todas las etapas del motor. Lógicamente, los rangos de presión a medir sufren grandes variaciones entre etapas, pero estas, no son suficientes para utilizar diferentes tipos de transductores para medir la presión en las diferentes fases.

En cada etapa la instalación del transductor va a ser distinta con el fin de adaptarse a las condiciones que se den y asegurar la integridad física del transductor.

La sonda utilizada es un transductor de la casa Omega de alta precisión y de acero inoxidable, concretamente pertenece a la serie PXM309, los cuales son la opción más idónea para monitorizar ambientes gaseosos a un coste relativamente moderado.

Características del sensor:

- *Rango.* De 70 mbares a 700 bares. Presión absoluta de 350 mbar a 20 bares.
- *Voltaje de suministro.* 15 a 30 Vcc.

- *Voltaje de funcionamiento.* No definido. Protegido de sobre voltajes y de polaridad inversa.
- *Precisión estática.* $\pm 0.25\%$ escala completa BFSL a 25°C incluyendo linealidad, histéresis y repetitividad.
- *Margen total de error.* 1 a 20 bar $\pm 1\%$ absoluta.
- *Temperatura de funcionamiento.* -20 a 85°C .
- *Conexión de presión.* G $\frac{1}{4}$ Macho (13.157mm).
- *Tipo de conexión.* Por cable.

2.4.1. Sensor P_2

La primera sonda PXM309 instalada según el ciclo termodinámico, se corresponde a la etapa comprendida entre la tobera de entrada y el compresor. Las condiciones que se dan en esta fase, son totalmente compatibles con los rangos de temperatura aceptados por el sensor. Esta sonda va a determinar la presión en la que el fluido entra en el motor.

En esta fase, cabe destacar que las condiciones termodinámicas que se dan serían compatibles con otras sondas más simples que un transductor de presión, sin embargo, la mayoría de sondas que se podrían usar en esta etapa no alcanzan las prestaciones necesarias que se necesitarían para poder obtener resultados fiables.

2.4.2. Sensor P_3

El sensor P_3 , si se sigue el orden del ciclo termodinámico iría posicionado antes del P_4 , pero esta última sonda PXM309 esta sometida a unas condiciones más adversas, por lo tanto, es de mayor facilidad resolver la implementación de un transductor en el caso más hostil para así imponer la misma metodología para unas condiciones no tan adversas. Si se hubiera hecho de manera inversa, hubiera habido la posibilidad de que el sensor P_4 no soportara la implementación aplicada para la sonda P_3 . De esta manera, el procedimiento de instalación que se sigue para implementar esta sonda esta explicado detalladamente en el apartado del sensor P_4 .

Entonces, el sensor P_3 es también un transductor de presión que se encarga de medir la presión obtenida a la salida del compresor del motor. Los valores a medir van más allá de los 300kPa y vienen acompañados de temperaturas superiores a los 190°C . Estas temperaturas no son lo suficientemente bajas para que se pueda instalar el transductor directamente en el interior del motor.

Para asegurar la integridad física del transductor, se va a seguir el mismo procedimiento utilizado en P_4 . Instalar un conducto de acero inoxidable que se encargue de disminuir la temperatura hasta valores soportables para la sonda, que va a evaluar el flujo saliente del compresor. Entonces, utilizando la expresión (2.34), las condiciones de contorno (2.35) y las (2.36), se puede obtener el perfil de temperatura a lo largo del conducto instalado.

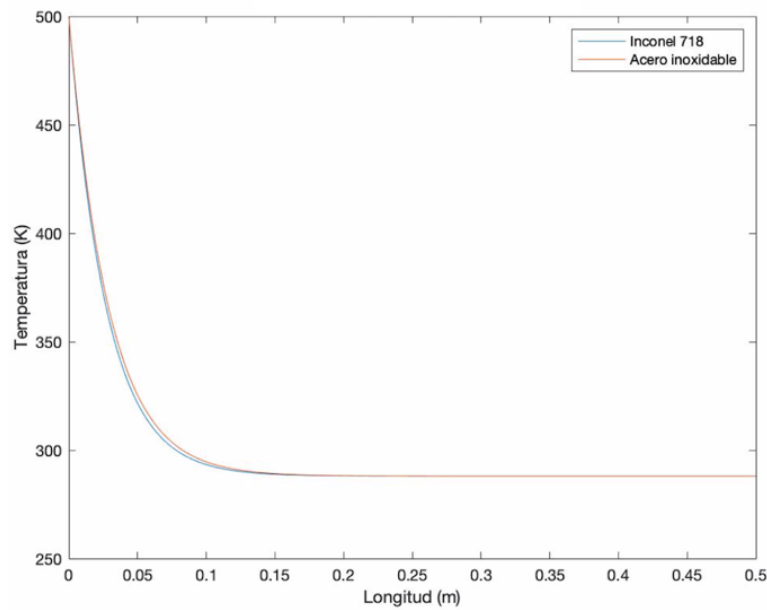


Figura 2.5. Perfil de temperatura para un diámetro de 2mm

Como se puede apreciar en la figura 2.5, la temperatura a la cual el flujo entra al conducto es de 500 K. A una distancia de 7 cm esta ya se habría reducido a unos 300 K, entonces, usando 10 cm de tubo se podría garantizar la integridad física de la sonda y la temperatura del flujo ya se situaría por debajo de los 25°C, que es el valor mínimo para asegurar un error de lectura máximo del $\pm 0.25\%$. La longitud de conducto utilizada va a ser mayor a la que teóricamente se necesitaría y estos centímetros de más son los que permitirían temperaturas más elevadas a la entrada del conducto si algún fallo se produjera en el motor.

2.4.3. Sensor P_4

El transductor de presión PXM309 que se instalará en esta etapa es el que más adaptaciones va a necesitar, debido a las condiciones extremas del fluido. Los transductores de presión comunes pueden soportar temperaturas de hasta 80°C, si se buscara mecanismos más especializados y más preparados, las temperaturas máximas soportadas podrían llegar hasta los 300°C. Aún así las temperaturas que se van a encontrar a la salida de la cámara de combustión, van a oscilar entre los 800 y los 900°C de modo que debido al alto coste de adquisición de un transductor de presión capaz de soportar temperaturas de este tipo, se va a optar por la instalación de un sistema alternativo con la intención de

disminuir la temperatura del flujo y proporcionar al transductor un flujo de gas con una temperatura que este dentro de los límites aceptables para la medición de su presión.

La solución que se propone para reducir la temperatura del flujo, es la instalación de un conducto metálico que aleje la columna de gas del motor a una distancia suficiente para disminuir la temperatura hasta los valores soportados por el transductor ($T_L = 80^\circ\text{C} = 353\text{ K}$).

El objetivo del montaje de dicho conducto metálico, es el intercambio de calor producido por la conducción térmica unidimensional a lo largo del conducto y la convección natural entre la superficie exterior del tubo y la atmósfera. Por otro lado, el fenómeno de radiación no se va a considerar ya que la influencia en dicho proceso es mínima y a la vez, simplifica considerablemente el problema. Para el diseño del conducto, las variables a tener en cuenta serán el coste del material y la longitud mínima necesaria para disminuir la temperatura.

2.4.3.1. Estimación de la longitud mínima de cable necesaria

Ecuación gobernante

Se considerará un cilindro uniforme inmerso dentro de un fluido T_∞ . La base del cilindro esta a sometido a la temperatura de combustión T_{t4} y se asume:

- Calor por convección unidimensional a lo largo del conducto.
- Convección Natural.
- Proceso estacionario ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$)

$$\sum \dot{Q} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+dx} - \dot{Q}_{conv} = m \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.28)$$

Dónde la potencia calorífica transmitida en $x + dx$, se puede expresar en términos de la transferida en x mediante la expresión (2.29).

$$\dot{Q}_{x+dx} = \dot{Q}_x + \frac{d\dot{Q}_x}{dx} + \dots \quad (2.29)$$

$$\left(\dot{Q}_x = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.30)$$

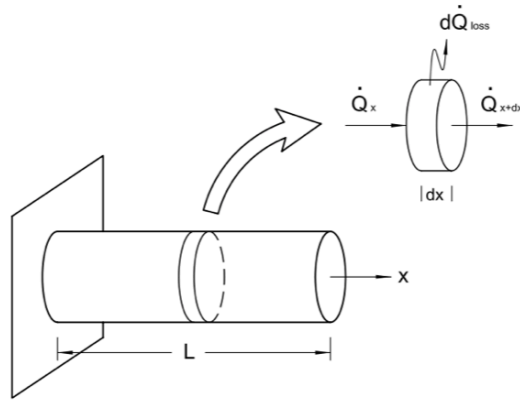


Figura 2.6. Esquema del intercambio de calor en elemento diferencial. [17]

Conociendo la potencia calorífica cedida en x que se muestra en la ecuación (2.30), se puede deducir la tasa de calor cedida en el término diferencial;

$$\dot{Q}_{x+dx} = -k \cdot A \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \left(\frac{\partial T^2}{\partial^2 x} \right) dx \right] \quad (2.31)$$

Las pérdidas de calor por convección se pueden estimar a partir de la ecuación (2.32).

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot p \cdot (T - T_{\infty}) \quad (2.32)$$

La variable h se define como el coeficiente de transferencia de calor por convección y p es el perímetro del cilindro.

Una vez conocidas todos los términos que intervienen en el proceso, se puede expresar el conjunto como:

$$-k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + k \cdot A \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \left(\frac{\partial T^2}{\partial^2 x} \right) dx \right] - h \cdot p \cdot (T - T_{\infty}) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T^2}{\partial^2 x} = m \cdot (T - T_{\infty}); \quad m \equiv \frac{h \cdot p}{k \cdot A} \quad (2.34)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (2.34) en estado estacionario, da como resultado una función exponencial del tipo $T(x) = A \cdot \exp(-mx) + B \cdot \exp(-mx)$,

cuya expresión se completa con la determinación de las constantes A y B a partir de las condiciones de contorno del problema.

Condiciones de contorno:

$$\rightarrow T(0) = T_0 \quad (2.35)$$

$$\rightarrow \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (2.36)$$

Perfil de temperatura resultante:

$$\frac{T(x) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{\cosh [m \cdot (L - x)]}{\cosh (m \cdot L)} \quad (2.37)$$

Coeficiente de transferencia de calor h

El parámetro m expresado en la ecuación (2.34) y el ratio de transferencia de calor de la superficie del cilindro expresado en la ecuación (2.32), vienen determinados por el coeficiente de transferencia de calor. Donde este está relacionado de la siguiente manera con el número de Nusselt.

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k_f} \quad (2.38)$$

Donde k_f es la conductividad térmica del fluido ambiente ($k_f(T_{amb} = 40^\circ\text{C}) = 0.02735 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$). Para un cilindro horizontal e isoterma, la correlación del número de Nusselt recomendado por Churchill y Chu [18] para procesos de convección natural pura se expresa en la ecuación (2.39).

$$\begin{aligned} \text{Para } 10^{-6} < Ra_D < 10^9 \quad \rightarrow \quad Nu_D \\ = 0.36 + \frac{0.518 \cdot Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Donde el número de Rayleigh Ra_D viene dado por:

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.40)$$

En este caso β, ν y α son las propiedades termodinámicas del fluido evaluadas a la temperatura de la película, que se puede estimar tomando el valor medio entre la temperatura media de la superficie del cilindro y la temperatura ambiente. β es el coeficiente de expansión térmica, ν es la viscosidad cinemática y α es la difusividad térmica.

$$T_s = \frac{T_{t4} - T_L}{2} = 733.5 \text{ K} \rightarrow T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} = 523.25 \text{ K} \quad (2.41)$$

Con todos los parámetros definidos, en la tabla 2.4 se recopilan los valores de las propiedades del material del cilindro y del fluido ambiente que envuelve dicho cilindro.

Propiedades termodinámicas del aire a temperatura T_f	
β	0.0019 1/K
ν	$4.11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
α	$59.93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Pr	0.71

Tabla 2.4. Propiedades termodinámicas del aire

Analizando las temperaturas que se alcanzaran después del proceso de combustión, se tiene que buscar un material capaz de soportar dichas temperaturas y que a la vez tenga una conductividad térmica relativamente alta. De esta manera, no supondrá un obstáculo para la transferencia de calor entre el fluido contenido en el cilindro y el aire.

Los materiales capaces de reunir estas prestaciones serían básicamente los materiales metálicos. Entonces, centrando la elección dentro de esta categoría, se podrían considerar varios materiales usados en aplicaciones similares como serían el tantalum, tungsten o el INCONEL 718 entre otros. Debido a que la temperatura de referencia a soportar este alrededor de los 850°C, con el INCONEL 718 habría más que suficiente, y es por eso que también se considerara el acero inoxidable por su bajo coste y su similitud en cuanto a propiedades térmicas. ($k(\text{INCONEL 718}) = 17.66 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$; $k(\text{A. Inox}) = 20.41 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$).

Si se simula 4 montajes diferentes, teniendo en cuenta un diámetro de tubo de 4mm, otro de 2mm y los dos materiales mencionados anteriormente los perfiles de temperatura obtenidos son los siguientes.

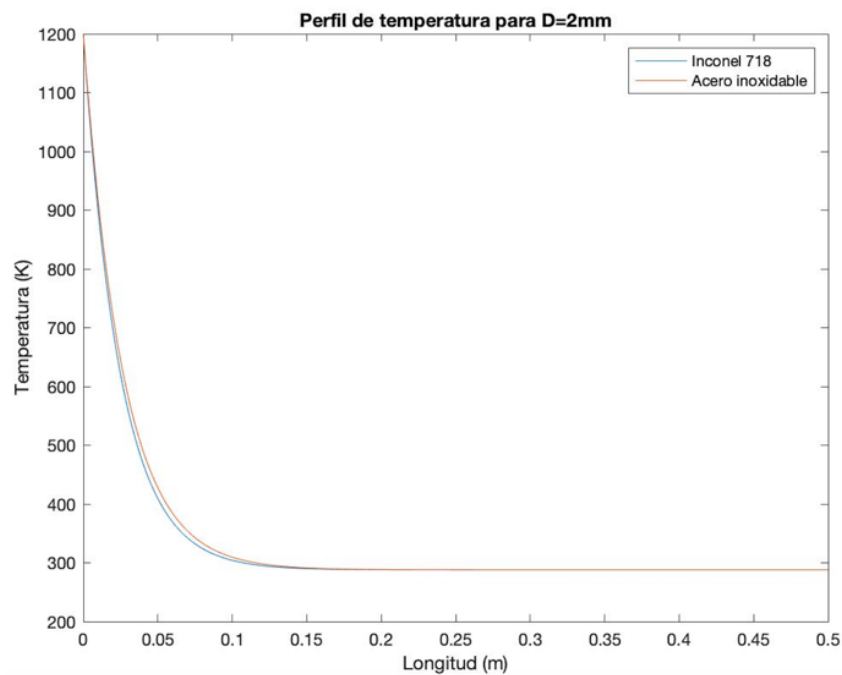


Figura 2.7. Perfil de temperaturas para un diámetro de 2mm

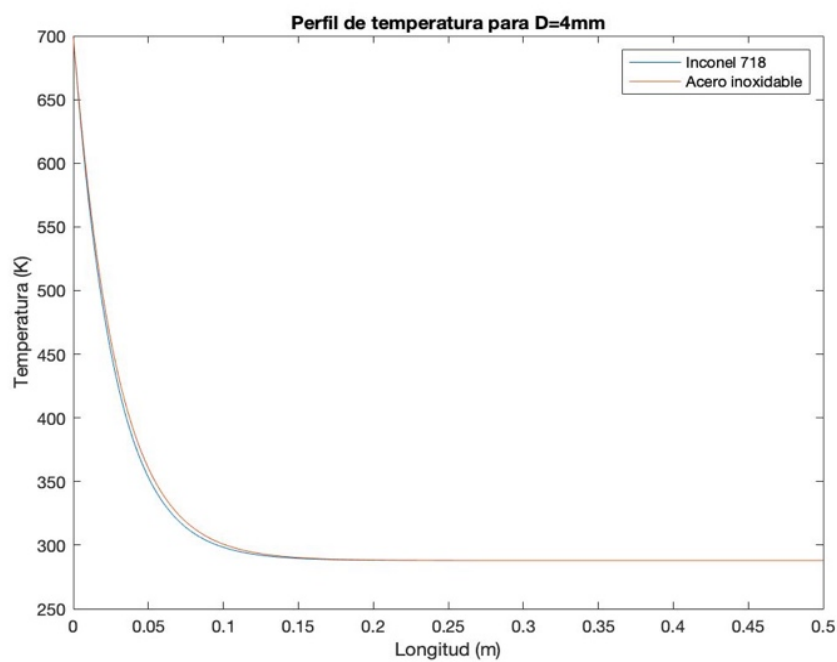


Figura 2.8. Perfil de temperaturas para un diámetro de 4mm

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que para ambos materiales, se necesitaría una longitud de tubo de unos 7 cm para cumplir con las especificaciones de los transductores de presión. Pero con el objetivo de asegurar la integridad física de estos sensores, sería conveniente alargar el tubo hasta unos 13-15cm. De esta manera, el dispositivo no trabajaría al límite de su

rango de medida, por lo que así se evitarían lecturas erróneas de presión debidas a una temperatura de entrada demasiado elevada.

Es importante tener en cuenta que el transductor ofrece un error de $\pm 0.25\%$ a 25°C con lo cual, es de vital importancia efectuar las lecturas de presión con el fluido a temperaturas no muy alejadas de los 25°C para garantizar el mínimo error posible.

2.4.4. Sensor P_5

Sonda PXM309 situada posteriormente a la turbina de expansión, la cual se encargará de evaluar la presión de los gases de salida del motor. En esta etapa, el flujo experimenta una descompresión y su presión disminuirá drásticamente, por otro lado, la temperatura que se experimentara oscilará entorno a valores cercanos a los 700°C .

Entonces, debido al rango de temperatura en la que va operar el sensor, nuevamente se va a precisar de un tubo de acero inoxidable con el objetivo de disminuir la temperatura hasta el rango de valores operables para el transductor.

De nuevo, se va a hacer referencia a la ecuación (2.33) y (2.34) con el fin de obtener el perfil de temperatura des de los casi 700°C hasta temperatura ambiente.

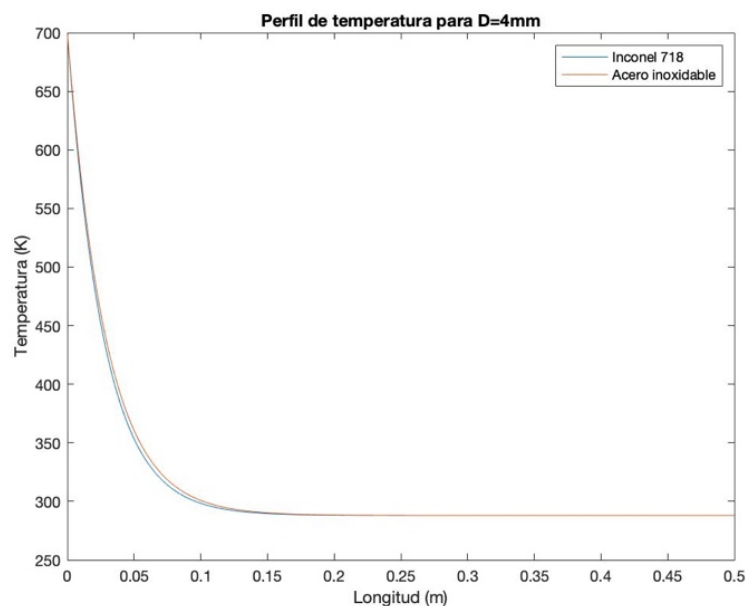


Figura 2.9. Perfil de temperaturas para un diámetro de 4mm

La figura 2.9 muestra el perfil de temperatura a lo largo del conducto de acero. Se puede observar, que para una longitud de 12cm, la temperatura del flujo ya esta por debajo de los 25°C . Consecuentemente, esta medida ya seria suficiente para una lectura idónea del flujo garantizando un error máximo del $\pm 0.25\%$.

2.5. Colocación de los sensores

2.5.1. Sensores de temperatura

Los termopares y RTD que se van a instalar en el motor, miden la temperatura o bien por área o por punto, sin esta ser afectada por otras variables termodinámicas del flujo. Por dicha razón, la instalación de los sensores de temperatura solo va a requerir la penetración de la carcasa de la turbina para que la probeta del termopar o RTD se encuentre con el flujo. La medición de la temperatura del flujo no sufre variaciones si dichos sensores se instalan con un ángulo determinado respecto al flujo, entonces, por cuestiones de comodidad, las sondas térmicas se instalarán mediante una perforación perpendicular respecto a la dirección de circulación del flujo que atraviesa el motor.

2.5.2. Sensores de presión

En cuanto a la instalación de las sondas de presión es de vital importancia saber que tipo de presión será la que vaya a medir. Para las sondas de presión correspondientes a etapas intermedias del motor, como sería la salida del compresor y la salida de la cámara de combustión, solo es necesario obtener medidas de la presión total que caracteriza el flujo.

En las fases donde se requiere la obtención de la presión total, es necesario instalar un tubo en forma de codo de 90° en el interior del motor que haga la función de tubo pitot. Este tubo tendrá que estar posicionado como el pitot que se muestra en la figura 16, enfocado en la dirección por donde viene el flujo para que este penetre en el interior del conducto. De esta forma, el flujo se detiene casi isentropicamente, recuperando así la presión total de gas incidente.

A la entrada del motor (*bellmouth*) y a la última etapa del motor correspondiente a la tobera, es necesario obtener valores de presión estática y de presión total. Entonces, en estas etapas se contará con la instalación de este tubo pitot. Para encontrar dichas variables es necesario tener en cuenta el efecto Bernoulli [19] que se produce dentro de cada tubo pitot que se va a instalar. Este efecto, predice una reducción de la velocidad del flujo que da lugar a un incremento de presión. Entonces, aplicando el principio de Bernoulli sobre el flujo de corriente que incide sobre el tubo pitot, es posible cuantificar la velocidad a la que entra el flujo de aire por la tobera de aspiración y la velocidad de escape de los gases de salida.

$$P_t = P_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.41)$$

Las sondas de presión estática, aprovechando las propiedades de la capa límite, medirán la presión del flujo estando incrustadas a la pared para no obstruir el

flujo de aire. Cabe decir, que los dos tipos de sondas instaladas en la primera y última etapa del motor, estarán posicionadas en el mismo tubo pitot. Entonces, el agujero central del pitot enfocado en dirección del flujo de aire, llevará dicho flujo a la sonda de presión total. Los agujeros laterales incrustados a la pared del pitot que se ven en la figura 2.10, llevarán el flujo hacia la sonda de presión estática.

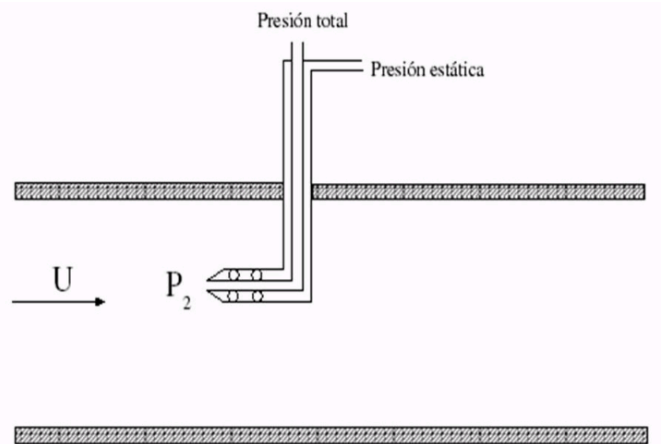


Figura 2.10. Esquema colocación sonda de presión. [20]

Para intervenir en el flujo de manera homogénea a la hora de instalar las sondas, se va a intentar situarlas en diferentes ángulos radiales respecto al motor. Entonces, si el motor tiene forma cilíndrica y la sección del motor forma una circunferencia de 2π grados, la forma idónea de colocar los sensores sería repartirlos uniformemente por los diferentes radiales de la sección.

Cabe decir, que la lectura ideal para cada variable termodinámica obtenida en cada fase del motor, se tendría que efectuar mediante el valor medio obtenido de la lectura de al menos tres sondas para cada variable a determinar. De esta forma los valores obtenidos podrían garantizar la fiabilidad suficiente y no estarían expuestos si alguno de ellos fallara. En la práctica, por cuestiones económicas, solo se va a utilizar una sonda para cada variable termodinámica medida en las etapas de la turbina.

Capítulo 3. Acondicionamiento de señal

Una vez se han escogido e instalado todas las sondas de temperatura y presión, es necesario realizar un acondicionamiento de la señal que estas nos dan con el objetivo de poder leer el valor de la variable termodinámica obtenido. Cada una de las sondas instaladas ofrece un tipo de respuesta diferente. Estas dependen totalmente de un buen tratamiento de la señal ya que sería imposible obtener un valor de temperatura o presión sin utilizar un sistema que prepare la señal para ser leído. Por esta razón, será necesario imponer diferentes tipos de circuito de tratamiento de la señal para cada tipo de respuesta proporcionada por las sondas.

3.1. Termopares

Este tipo de sensores son muy sensibles y necesitan una referencia de compensación en frío donde evaluar la temperatura medida en la junta caliente. Además, es de vital importancia incorporar un buen amplificador ya que la respuesta ofrecida de los termopares es del orden de mV.

3.1.1 Hardware

3.1.1.1. Microcontrolador: Raspberry Pi.

Será el microcontrolador utilizado en todas las etapas de acondicionamiento de señal. Se trata de un ordenador de placa reducida con diferentes puertos y conexiones por donde se van a comunicar los diferentes elementos del sistema. Funciona mediante el lenguaje Python y se requerirá de diferentes códigos de programación [21] dependiendo del tipo de sonda y el sistema que esta utilice para acondicionar la señal.

3.1.1.2. Amplificador/ADC: MAX31855

Es el tipo de chip utilizado para la amplificación de la señal en el circuito. El MAX31855 realiza una compensación en la unión fría y digitaliza la señal en un termopar tipo K, J, N, T, S, R o E. Los datos se emiten en un formato de lectura de 14 bits compatible con SPI (*serial peripheral interface*). El convertidor resuelve temperaturas con una exactitud de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$, permitiendo un rango de lecturas de temperatura entre -270°C y 1800°C . Según las especificaciones del producto, para temperaturas comprendidas entre -200°C y 700°C la precisión del amplificador es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, para temperaturas superiores a estas e inferiores a 1372°C la precisión del chip disminuye hasta $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Siguiendo las características térmicas del amplificador, se fijará un error máximo de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para la etapa de expansión de gases y un error máximo de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ para la etapa de combustión.

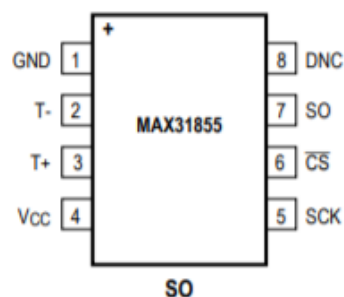


Figura 3.1. Configuración de pines del MAX31855.[22]

Configuración de pines:

1. GND. Tierra.
2. T-. Entrada termopar (Tipo K \rightarrow T- corresponde al cable de aluminio).
3. T+. Entrada termopar (Tipo K \rightarrow T+ corresponde al cable de cromo).
4. Vcc. Tensión de alimentación.
5. SCK. Entrada de reloj serial.
6. \overline{CS} . Selector para habilitar la interfaz de serie.
7. SO. Salida de datos de serie.
8. DNC. No conectar.

En la figura 3.2, se pueden observar las aplicaciones típicas en las que se usa este chip y la relación de conectividad de este con las entradas a amplificar (valores del termopar) y el microcontrolador (raspberry PI).

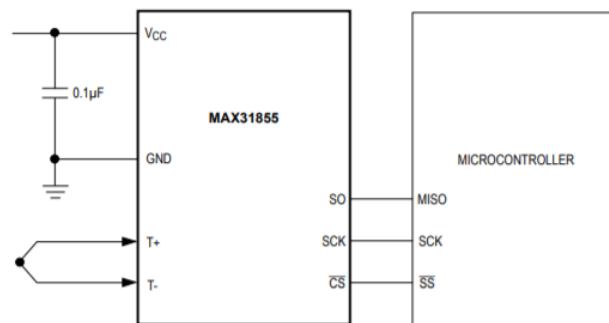


Figura 3.2. Aplicación usual del MAX31855. [22]

3.1.1.3. Panel de conexiones: Protoboard

Para armar el circuito se va a necesitar una placa de pruebas o placa de inserción, la cual está cubierta por una serie de orificios interconectados eléctricamente entre sí siguiendo un patrón horizontal o vertical. A partir de dichos orificios se van a conectar los diferentes componentes electrónicos y cables eléctricos para cerrar el circuito eléctrico.

3.1.2. Software

Para el funcionamiento del sistema, se debe sincronizar el microcontrolador del circuito con los diferentes elementos del circuito, en este caso con el MAX31855. El microcontrolador que se va a utilizar utiliza Python como lenguaje informático, consecuentemente se va a tener que descargar e instalar la biblioteca de Python para poder usar el MAX31855. Una vez se dispone de las dependencias y de la biblioteca necesaria, se puede programar el código, el cual contendrá la relación de configuración de pines comentada anteriormente. El software a utilizar en el sistema es el mismo para todos los elementos que se van a usar, por esta razón,

el procedimiento de instalación y de sincronización entre el microcontrolador y las sondas también será el mismo.

3.2. RTDs

Los RTDs tal y como se ha explicado anteriormente contienen un resistor que cambia el valor de la resistencia a medida que la temperatura varia. Gracias a su funcionamiento, se puede definir como un sensor altamente preciso y estable, pero para poder exprimir estos beneficios es necesario instalar un amplificador diseñado para leer la baja resistencia del RTD y que a la misma vez, sea capaz de ajustar y compensar automáticamente el valor de dicho termistor.

3.2.1 Hardware

El hardware utilizado para el acondicionamiento de la señal de los RTD, es prácticamente el mismo usado para los termopares. En este caso, se utiliza un amplificador muy parecido, pero este está diseñado específicamente para dar uso a los sensores tipo RTD. El microcontrolador del circuito nuevamente es la *Raspberry Pi* y la base del circuito, se asentará en la misma *protoboard* utilizada para los termopares.

3.2.1.1. Amplificador/ADC: MAX31865

Es el chip encargado de tratar la señal proveniente de la sonda, para que esta pueda ser leída por el microcontrolador. Se trata de un conversor de temperatura optimizado para RTD. El funcionamiento se basa en un termistor externo que establece la sensibilidad para el RTD usando un conversor analógico – digital (ADC), el cual convierte la relación de la resistencia RTD en relación a resistencia de referencia en forma digital. Las entradas del MAX31865 están protegidas contra picos de tensión.

Este chip se ajusta perfectamente a las necesidades establecidas en la aplicación ya que es capaz de manejar resistencias hasta $1k\Omega$, permite sensores con conexiones de 2,3 o 4 pines y es compatible con la interfaz de periféricos en serie (SPI) que se va a usar en este caso.

Configuración de pines

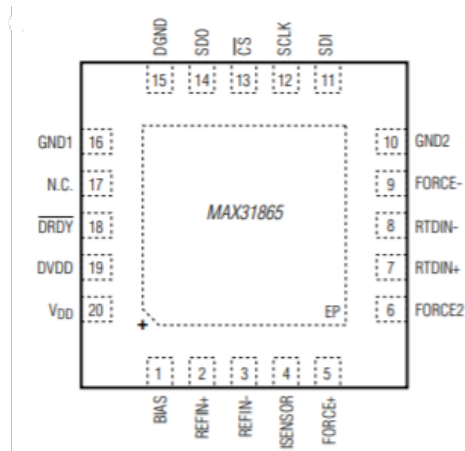


Figura 3.3. Configuración de pines del MAX31865. [23]

1. BIAS. Salida de voltaje bias (V_{BIAS})
2. REFIN+. Voltaje de referencia positivo
3. REFIN-. Voltaje de referencia negativo
4. ISENSOR. Corresponde al lado inferior de R_{REF}
5. FORCE+. Corresponde al lado superior de la unidad del RTD
6. FORCE2. Entrada positiva que solo se usa en RTD con conexión a 3 cables
7. RTDIN+. Entrada positiva del RTD
8. RDTIN-. Entrada negativa del RTD
9. FORCE-. Lado inferior del retorno del RTD
10. GND2. Conexión a tierra analógica.
11. SDI. Conexión de entrada para los datos en serie
12. SCLK. Conexión de entrada para el reloj de los datos en serie
13. \overline{CS} . Selector para habilitar la interfaz de serie
14. SDO. Conexión de salida para los datos en serie
15. DGND. Conexión a tierra digital
16. GND1. Conexión a tierra analógica que se enlaza con GND2
17. DNC. No se debe conectar
18. \overline{DRDY} . Active-low, Push-pull, Data-ready output
19. DVDD. Entrada de la tensión de alimentación para el digital
20. V_{DD} . Entrada de la tensión de alimentación para el analógico

3.3. Transductores de presión

Este tipo de sondas de presión funcionan a un voltaje de 10V a diferencia de la entradas de la *Raspberry Pi* que funcionan a un voltaje máximo de 3.3V. Esta diferencia de tensión que se encuentra entre los dos elementos del circuito, hace indispensable la utilización de un sistema que adapte los elementos electrónicos.

Para resolver este desfase de voltaje se va a utilizar un variador de tensiones o *logic level shifter*. Este elemento electrónico se compone de un circuito que traduce señales de un nivel lógico o dominio de voltaje a otro, permitiendo la compatibilidad entre circuitos integrados con diferentes requisitos de voltajes, como sería un transductor de presión y un microcontrolador tipo *Raspberry PI*.

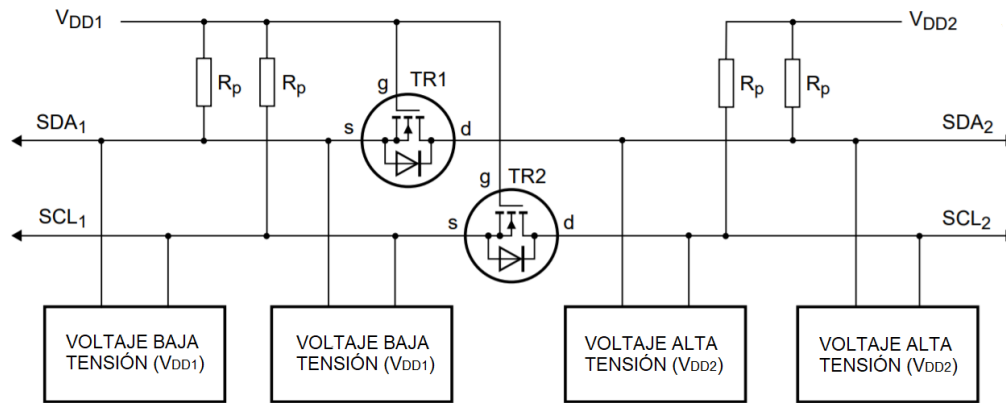


Figura 3.4. Esquema montaje de un variador de tensiones

Por otro lado, también se va a necesitar un convertidor analógico-digital que se encargue de adaptar la señal analógica que proporciona el transductor de presión para que esta pueda ser leída por el microcontrolador.

3.3.1. Hardware

De mismo modo que en los casos anteriores, el hardware utilizado para el acondicionamiento de señal proveniente de las sondas de presión utiliza la misma placa de conexiones y microcontrolador que los utilizados en los sensores de temperatura. En este sistema se incluye el ya introducido variador de tensiones y un nuevo amplificador para tensiones superiores.

3.3.1.1. Variador de tensiones: BSS138

Se compone de 4 canales bidireccionales con resistores *pull-up* de $10k\Omega$. Por el lado de baja tensión, es capaz de trabajar con un mínimo de 1.8V y por el lado de altas permite un voltaje de hasta 10V, característica que lo hace idóneo para una aplicación como esta.

Configuración de pines

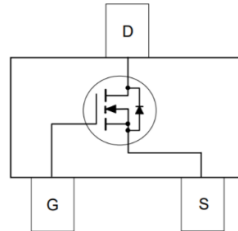


Figura 3.5. Configuración de pines del BSS138. [24]

1. DRAIN. Corriente que fluye a través del lado de drenaje
2. GATE. Controla el *MOFFSET*
3. SOURCE. Corriente que fluye a través del lado de la fuente

3.3.1.2. Amplificador/ADC: MCP3428

Este convertidor analógico-digital está diseñado para convertir señales de 0 a 10V, en el mismo circuito está integrado un sistema de amplificación de la señal. El MCP3428 es una placa que puede dar servicio hasta a 4 canales distintos con una resolución de 16 bits, lo cual es ideal para la monitorización de sensores de alta resolución y baja velocidad. Este chip, es capaz de leer voltajes analógicos a 15 muestras por segundo con una resolución de 16 bits o 240 muestras por segundo a una resolución de 12 bits. El MCP3428 tiene un amplificador de ganancia programable x1, x2, x4, x8, por lo que es una opción ideal para monitorear sensores de voltaje extremadamente bajo. Los 4 canales tienen entradas diferenciales, capaces de monitorear un rango de escala completa de 0-10V. Los distintos canales que ofrece el MCP3428 permite conectar un total de 8 dispositivos los cuales compartirían un solo puerto de comunicación I²C, utilizando dos entradas de dirección flotante.

La principal ventaja de trabajar con un chip capaz de aceptar varias entradas simultáneas, es que permite la conexión de distintos sensores a la vez, permitiendo utilizar un solo MCP3428 para 4 transductores de presión distintos.

Configuración de pines:

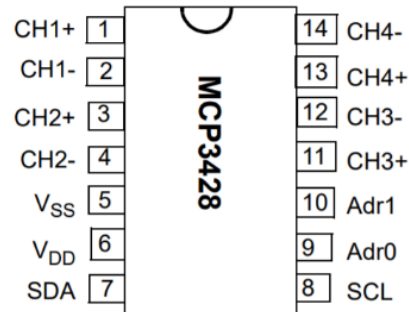


Figura 3.6. Configuración de pines del MCP3428. [25]

1. CH1+. Pin de la entrada positiva de la conexión analógica del canal 1
2. CH1-. Pin de la entrada negativa de la conexión analógica del canal 1
3. CH2+. Pin de la entrada positiva de la conexión analógica del canal 2
4. CH2-. Pin de la entrada negativa de la conexión analógica del canal 2
5. V_{SS}. Conexión a tierra
6. V_{DD}. Fuente de alimentación
7. SDA. Pin bidireccional de los datos en serie de la interfaz I^2C
8. SCL. Pin del reloj de la interfaz I^2C
9. Adr0. Pin de selección de la dirección I^2C
10. Adr1. Pin de selección de la dirección I^2C
11. CH3+. Pin de la entrada positiva de la conexión analógica del canal 3
12. CH3-. Pin de la entrada negativa de la conexión analógica del canal 3
13. CH4+. Pin de la entrada positiva de la conexión analógica del canal 4
14. CH4-. Pin de la entrada negativa de la conexión analógica del canal 4

Conclusiones

Comprender el ciclo termodinámico por el cual se rige una máquina térmica no es fácil, cuando se profundiza en él, uno se puede dar cuenta de la inmensidad de factores y consideraciones que hay que tener en cuenta para poder aproximarse a la realidad de dicha máquina. Gracias a un estudio como el que se ha llevado en este trabajo, se puede entender mejor el funcionamiento de una turbina de gas real. A partir de la utilización de un ejemplar miniaturizado los elementos que intervienen se reducen al mínimo, teniendo en cuenta los principios básicos y más simples de funcionamiento con los que uno se puede centrar para poder crear una base sólida de conocimiento sobre el tema.

La focalización principal de este proyecto siempre ha estado centrada en el desarrollo de una bancada de pruebas para un motor a reacción, un sistema capaz de obtener las principales variables termodinámicas de dicha máquina y a partir de ellas poder extraer las actuaciones del motor en tiempo real. Este sistema se ha caracterizado por la precisión de cada elemento que lo constituía, ya que esta característica sería la que determinaría la efectividad y fiabilidad de los resultados proporcionados por dicho sistema. De este modo, la gama de los elementos utilizados siempre ha estado condicionada por su influencia en los procesos calculados y los resultados obtenidos.

Por otro lado, cuando se necesita adecuar el proyecto con los recursos económicos que se establecen, la tarea aumenta de dificultad, anulando todos los componentes que realizarían la función, pero no se encuentran dentro del alcance. Consecuentemente, uno debe ingeniar la manera de llegar al mismo objetivo, pero utilizando métodos que suponen más esfuerzo del que otro tipo de componentes habrían podido requerir. Así mismo, dicha condición suponía uno de los principales objetivos del proyecto para poder materializar la construcción de un sistema de medición para el micro turbojet.

Una vez efectuado un análisis del ciclo termodinámico del motor, se puede concluir que las variables principales a tener en cuenta son la temperatura y la presión en cada etapa del ciclo. Por esta razón, el estudio prospectivo de los componentes que constituirían el sistema de medición estaría totalmente enfocado a dichas variables. El estudio preliminar del ciclo termodinámico también serviría para filtrar la búsqueda de los elementos de medición que serían necesarios en cada fase del motor, descartando todos los otros componentes que no serían capaces de soportar las condiciones que se dieran en dichas etapas o las especificaciones que se solicitan para el sistema.

Una parte de este estudio se ha focalizado en un cálculo exhaustivo de propagación de errores para determinar la mínima precisión que necesitaba cada componente. Para cada punto de error porcentual en el cálculo de el rendimiento politrópico del compresor se requiere un error máximo del 0,136% para las sondas P_2 y P_3 y del 0,05% para las sondas de temperatura T_2 y T_3 . Para el caso del rendimiento politrópico de la turbina la precisión de las sondas todavía es más decisiva, ya que para cada punto de error porcentual en su cálculo se requiere un error máximo del 0,087% para P_4 y P_5 y del 0,05% para T_4 y T_5 . Con esto, se puede concluir que la etapa más crítica del sistema sería la fase de expansión de gases seguida por la etapa de compresión.

En consecuencia a los cálculos obtenidos en este apartado del proyecto, se ha optado por implementar termopares de calidad especial para las etapas críticas del ciclo con una precisión del 0,4%, RTDs de clase A con una precisión del 0.56% y transductores de presión de calidad estándar con una precisión del 0,5%. A diferencia de las sondas de temperatura, los transductores de presión no necesitan estar dotados de calidad especial con una mayor precisión, esto se debe a que el error porcentual que añaden al sistema por cada punto de error porcentual en el cálculo de eficiencias politrópicas es muy inferior al error que las sondas de temperatura proporcionan.

Este proyecto a centrado la gran mayoría del trabajo en la realizar un estudio teórico capaz de detallar profundamente todo el proceso de instalación de un sistema de medición para un motor de reacción. A demás, la añadida prolongación para terminar de definir teóricamente los procesos de medida, instalación y acondicionamiento a conllevado no poder adentrarse como habría gustado en la parte más práctica del proyecto. Entonces, con el fin de completar este estudio termodinámico, se hace indispensable una futura aplicación práctica de todos los procesos que se han detallado en dicho estudio. Esta futura parte más aplicada, se basaría en la instalación de todas las sondas mencionadas en el proyecto junto con el acondicionamiento de señal que requiere cada una de ellas. Con ello se podría corroborar el análisis teórico que se ha implementado para detectar posibles errores, mejoras o encontrar posibles incisos que se han podido pasar por alto en un principio. Finalmente, la completa instalación del sistema de medición permitirá obtener las actuaciones del motor en tiempo real y comprobar su efectividad operacional.

Bibliografía

- [1] Shuttleworth, Martyn. 2008. "Heron's Aeolipile." *www.explorable.com*.
- [2] Martínez, Israel. 2004. «100 años de la aviación.» https://www.researchgate.net/publication/274393687_100_anos_de_vuelo_-_Revision_de_Antecedentes_del_avion_Flyer_I_Volador_I_100_years_of_flight_-_Background_review_for_airplane_Flyer_I
- [3] Oppong, Francis. 2010. *An overview of micro gas turbine engine performance investigation*.
- [4] Quattrochi, Douglas. 2006. *Brayton cycle*. Massachusetts Institute of Technology.
- [5] Evojet. 2018. «RC Model Jet Engines B110neo - B170neo - B220neo.» 52379 Langerwehe Germany.
- [6] Fadilah, P A, y D F Erawan. 2018. *Small centrifugal compressor performance trend prediction based on computational fluid dynamic*. J. Phys.: Conf. Ser. 1130 012029.
- [7] Mohammed, Rashid Slaheldinn Elhaj. 2019. «Design and Analysis of Annular Combustion Chamber for a Micro Turbojet Engine.» *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*.
- [8] Pathirathna, K A B. 2013. *Gas Turbine Thermodynamic and Performance Analysis Methods Using Available Catalog Data*. KTH Industrial Engineering and Management.
- [9] Fathy, Tamer S., Aly M. Elzahaby, y Mohamed K. Khalil. 2018. «Reverse Engineering of Micro Turbojet Centrifugal Compressor Design Based on Parametric CAD Data.» *International Journal of Scientific & Engineering Research*.
- [10] Martinez, I. 2000. «Fuel Properties.»
- [11] Aly, Amgad M B, y Ibrahim Atia. 2012. *Neural Modeling and Predictive Control of a Small Turbojet Engine*. Atlanta, Georgy: Aerospace Research Central
- [12] Instruments, Texas. 2018. «A Basic Guide to Thermocouple Measurements.» September.
- [13] instruments, National. 2019. «Temperature Sensor Basics.» March.
- [14] Watlow. 2017. *Watlow Sensors Catlog*.
- [15] Oung, Oubbol, y Adam Bezuijen. 2003. «Selective pore pressure transducers to use in model tests to study two-phase flow in porous media.» *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*.
- [16] Barberree, Daniel A. 2002. «The next generation of thermocouples for the turbine engine industry.» *Annual International Instrumentation Symposium*.
- [17] Rangel, David Moreno, Paula M. Esquivias, Manuel F, y fernandez. 2017. «A comparison of closed-form and finite-element solutions for heat transfer in a nearly horizontal, unglazed flat plate PVT water collector: Performance assessment.» *Solar energy vol.141*.
- [18] Churchill, S W, y H H S CHu. 1980. «Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder.» *International Journal of Heat Mass Transfer*.

- [19] Hall, Nancy. 2015. «Pitot Static Tube or Prandtl tube.» *National Aeronautics and Space Administration*. 09 de September.
- [20] 2006. «Introduction to Pitot Tube Flow Measurement.»
- [21] Upton, Eben, y Gareth Halfcare. 2014. «Raspberry Pi - User Guide.»
- [22] MaximIntegrated. s.f. «MAX31855 Datasheet.»
- [23] MaximIntegrated. s.f. «MAX31865 Datasheet RTD-to-Digital-Converter.»
- [24] ON Semiconductor. s.f. «BSS138 N-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor.»
- [25] Microchip. s.f. «16-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I2CTM Interface and On-Board Reference.»

APÉNDICE I: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MAX31855 EN UNA RASPBERRY PI

Software



This guide is no longer supported. For more information about using the MAX31855 with Python and CircuitPython, check out: <https://learn.adafruit.com/thermocouple>

To install and use the [MAX31855 Python library \(https://adafru.it/e02\)](https://adafru.it/e02) follow the steps below.

Before you get started make sure your board is connected to the internet through an ethernet or wireless connection so you can download dependencies.

You'll also want to be familiar with connecting to a [Raspberry Pi \(https://adafru.it/jvB\)](https://adafru.it/jvB) or [BeagleBone Black \(https://adafru.it/ne9\)](https://adafru.it/ne9) terminal with SSH.

Dependencies

First install dependencies by executing in a terminal:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install build-essential python-dev python-pip python-smbus git
```

You can ignore warnings about dependencies which are already installed.

Raspberry Pi

On a Raspberry Pi execute the following to make sure the RPi.GPIO library is installed:

```
sudo pip install RPi.GPIO
```

BeagleBone Black

On a BeagleBone Black execute the following to make sure the Adafruit_BBIO library is installed:

```
sudo pip install Adafruit_BBIO
```

Library Install

Next download the MAX31855 Python library to your home directory and install it by executing:

```
cd ~
git clone https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_MAX31855.git
cd Adafruit_Python_MAX31855
sudo python setup.py install
```

That's all you need to do to install the Python library!

Usage

To learn how to use the MAX31855 Python library you can run and review an example program included with the library. First navigate to the **examples** directory and open the **simpletest.py** script in a text editor. Scroll down to the

part of the code which configures the connection with the MAX31855 board:

```
# Uncomment one of the blocks of code below to configure your Pi or BBB to use
# software or hardware SPI.

# Raspberry Pi software SPI configuration.
CLK = 25
CS = 24
D0 = 18
sensor = MAX31855.MAX31855(CLK, CS, D0)

# Raspberry Pi hardware SPI configuration.
#SPI_PORT = 0
#SPI_DEVICE = 0
#sensor = MAX31855.MAX31855(spi=SPI.SpiDev(SPI_PORT, SPI_DEVICE, max_speed_hz=5000000))

# BeagleBone Black software SPI configuration.
#CLK = 'P9_12'
#CS = 'P9_15'
#D0 = 'P9_23'
#sensor = MAX31855.MAX31855(CLK, CS, D0)

# BeagleBone Black hardware SPI configuration.
#SPI_PORT = 1
#SPI_DEVICE = 0
#sensor = MAX31855.MAX31855(spi=SPI.SpiDev(SPI_PORT, SPI_DEVICE, max_speed_hz=5000000))
```

By default the configuration to use a Raspberry Pi with software SPI is uncommented, however you can comment that block and uncomment a different block to use a different connection type.

If you've changed the pins which are connected to the hardware make sure to update the pin values in the in the code here!

Once the right block of configuration for your hardware is uncommented, save the file and exit the text editor. Then run the example by executing:

```
sudo python simpletest.py
```

If everything goes well you should see the thermocouple and internal temperature displayed every second:

```
Press Ctrl-C to quit.
Thermocouple Temperature: 22.000°C / 71.600°F
  Internal Temperature: 23.312°C / 73.963°F
Thermocouple Temperature: 22.250°C / 72.050°F
  Internal Temperature: 23.375°C / 74.075°F
Thermocouple Temperature: 27.500°C / 81.500°F
  Internal Temperature: 23.312°C / 73.963°F
...
```



If you get the reported temperature going up when the thermocouple is cooled, and vice versa - try swapping the thermocouple red/yellow wires!

If you see an error make sure you're running the program as root with the sudo command, and that the dependencies & library were installed successfully.

To understand the usage, open `simpletest.py` in a text editor and follow along with the description of the code below.

```
import Adafruit_MAX31855.MAX31855 as MAX31855
```

First the MAX31855 module is imported with a Python import statement.

```
# Uncomment one of the blocks of code below to configure your Pi or BBB to use
# software or hardware SPI.

# Raspberry Pi software SPI configuration.
CLK = 25
CS = 24
DO = 18
sensor = MAX31855.MAX31855(CLK, CS, DO)

# Raspberry Pi hardware SPI configuration.
#SPI_PORT = 0
#SPI_DEVICE = 0
#sensor = MAX31855.MAX31855(spi=SPI.SpiDev(SPI_PORT, SPI_DEVICE, max_speed_hz=5000000))

# BeagleBone Black software SPI configuration.
#CLK = 'P9_12'
#CS = 'P9_15'
#DO = 'P9_23'
#sensor = MAX31855.MAX31855(CLK, CS, DO)

# BeagleBone Black hardware SPI configuration.
#SPI_PORT = 1
#SPI_DEVICE = 0
#sensor = MAX31855.MAX31855(spi=SPI.SpiDev(SPI_PORT, SPI_DEVICE, max_speed_hz=5000000))
```

Next you see the hardware configuration which was described earlier. It's important to note that you can configure using software SPI by passing explicit CLK, DS, and DO digital GPIO pins, or you can configure hardware SPI by passing a SpiDev hardware SPI object to the MAX31855 class initializer.

```
# Loop printing measurements every second.
print 'Press Ctrl-C to quit.'
while True:
    temp = sensor.readTempC()
    internal = sensor.readInternalC()
    print 'Thermocouple Temperature: {0:0.3F}*C / {1:0.3F}*F'.format(temp, c_to_f(temp))
    print '    Internal Temperature: {0:0.3F}*C / {1:0.3F}*F'.format(internal, c_to_f(internal))
    time.sleep(1.0)
```

Finally the example enters a loop where it reads temperature measurements and prints them out every second. The important thing to see are the two temperature measurement functions, `readTempC()` and `readInternalC()`.

The `readTempC()` function will read the temperature at the thermocouple probe. If you aren't familiar with how thermocouples determine temperature, make sure to [read the thermocouple guide \(https://adafru.it/qhE\)](https://adafru.it/qhE).

APÉNDICE II: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MAX31865 EN UNA RASPBERRY PI

CircuitPython Installation of MAX31865 Library

Next you'll need to install the [Adafruit CircuitPython MAX31865 \(https://adafru.it/Cbp\)](https://adafru.it/Cbp) library on your CircuitPython board.

First make sure you are running the [latest version of Adafruit CircuitPython \(https://adafru.it/tBa\)](https://adafru.it/tBa) for your board.

Next you'll need to install the necessary libraries to use the hardware--carefully follow the steps to find and install these libraries from [Adafruit's CircuitPython library bundle \(https://adafru.it/zdx\)](https://adafru.it/zdx). For example the Circuit Playground Express guide has [a great page on how to install the library bundle \(https://adafru.it/Bf2\)](https://adafru.it/Bf2) for both express and non-express boards.

Remember for non-express boards like the Trinket M0, Gemma M0, and Feather/Metro M0 basic you'll need to manually install the necessary libraries from the bundle:

- `adafruit_max31865.mpy`
- `adafruit_bus_device`

Before continuing make sure your board's lib folder or root filesystem has the `adafruit_max31865.mpy`, and `adafruit_bus_device` files and folders copied over.

Next [connect to the board's serial REPL \(https://adafru.it/Awz\)](https://adafru.it/Awz) so you are at the CircuitPython `>>>` prompt.

Python Installation of MAX31865 Library

You'll need to install the Adafruit_Blinka library that provides the CircuitPython support in Python. This may also require enabling I2C on your platform and verifying you are running Python 3. [Since each platform is a little different, and Linux changes often, please visit the CircuitPython on Linux guide to get your computer ready \(https://adafru.it/BSN\)](https://adafru.it/BSN)!

Once that's done, from your command line run the following command:

- `sudo pip3 install adafruit-circuitpython-max31865`

If your default Python is version 3 you may need to run 'pip' instead. Just make sure you aren't trying to use CircuitPython on Python 2.x, it isn't supported!

CircuitPython & Python Usage

To demonstrate the usage of the sensor we'll initialize it and read the range and more from the board's Python REPL.

Run the following code to import the necessary modules and initialize the SPI connection with the sensor:

```
import board
import busio
import digitalio
import adafruit_max31865
spi = busio.SPI(board.SCK, MOSI=board.MOSI, MISO=board.MISO)
cs = digitalio.DigitalInOut(board.D5) # Chip select of the MAX31865 board.
sensor = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs)
```

Notice you need to explicitly define the chip select digital I/O pin--be sure to use the same pin as your wiring (D5 if following this example exactly).

Notice you need to explicitly define the chip select digital I/O pin--be sure to use the same pin as your wiring (D5 if following this example exactly).

By default the MAX31865 class assumes a **2 wire** sensor, however you can change this by setting the **wires** keyword argument in the initializer. Set this to the number of wires in your sensor (2, 3, or 4). For example to create a 3 wire sensor:

```
import board
import busio
import digitalio
import adafruit_max31865
spi = busio.SPI(board.SCK, MOSI=board.MOSI, MISO=board.MISO)
cs = digitalio.DigitalInOut(board.D5) # Chip select of the MAX31865 board.
sensor = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs, wires=3)
```

Be sure to set **wires** to the appropriate value for your sensor!

In addition you can specify the nominal resistance and reference resistance of the RTD with these optional keyword arguments of the initializer:

- **rtd_nominal** - This is the resistance value in Ohms of the RTD at a nominal value (typically 0 degrees Celsius). This defaults to 100 for a PT100 sensor. **For a PT1000 change it to 1000 Ohms.**
- **ref_resistor** - The reference resistor value in Ohms. The default is 430 Ohms which matches the PT100 version of the breakout. **For a PT1000 breakout change this to 4300 Ohms.**

For example here's how to create a 2-wire PT1000 sensor instance with 1000 Ohm nominal resistance and 4300 Ohm reference resistance:

```
import board
import busio
import digitalio
import adafruit_max31865
spi = busio.SPI(board.SCK, MOSI=board.MOSI, MISO=board.MISO)
cs = digitalio.DigitalInOut(board.D5) # Chip select of the MAX31865 board.
sensor = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs, rtd_nominal=1000.0, ref_resistor=4300.0)
```

Now you're ready to read values from the sensor using any of these properties:

- **temperature** - The temperature measured by the sensor in degrees Celsius.
- **resistance** - The resistance of the RTD in Ohms.

```
print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(sensor.temperature))
print('Resistance: {0:0.3f} Ohms'.format(sensor.resistance))
```

```
>>> print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(sensor.temperature))
Temperature: 23.402C
>>> print('Resistance: {0:0.3f} Ohms'.format(sensor.resistance))
Resistance: 109.127 Ohms
>>>
```

See the [simpletest.py example \(https://adafru.it/Cbr\)](https://adafru.it/Cbr) for a complete demo of printing the range every second. Save this as **code.py** on the board and examine the REPL output to see the temperature printed every second.

That's all there is to using the MAX31865 with CircuitPython!

Full Example Code

```
# Simple demo of the MAX31865 thermocouple amplifier.
# Will print the temperature every second.
import time
```

```
import board
import busio
import digitalio

import adafruit_max31865

# Initialize SPI bus and sensor.
spi = busio.SPI(board.SCK, MOSI=board.MOSI, MISO=board.MISO)
cs = digitalio.DigitalInOut(board.D5) # Chip select of the MAX31865 board.
sensor = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs)
# Note you can optionally provide the thermocouple RTD nominal, the reference
# resistance, and the number of wires for the sensor (2 the default, 3, or 4)
# with keyword args:
#sensor = adafruit_max31865.MAX31865(spi, cs, rtd_nominal=100, ref_resistor=430.0, wires=2)

# Main loop to print the temperature every second.
while True:
    # Read temperature.
    temp = sensor.temperature
    # Print the value.
    print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(temp))
    # Delay for a second.
    time.sleep(1.0)
```

APÉNDICE III: CÓDIGO PYTHON PARA LA INSTALACIÓN DEL MCP3428 EN UNA RASPBERRY PI

```
import
smbus

import time

# Get I2C bus
bus = smbus.SMBus(1)

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Send configuration command
#           0x10(16)Continuous conversion mode, Channel-1, 12-bit Resolution
bus.write_byte(0x68, 0x10)

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Read data back from 0x00(0), 2 bytes
# raw_adc MSB, raw_adc LSB
data = bus.read_i2c_block_data(0x68, 0x00, 2)

# Convert the data to 12-bits
raw_adc = (data[0] & 0x0F) * 256 + data[1]
if raw_adc > 2047 :
    raw_adc -= 4095

# Output data to screen
print "Digital value of Analog Input on Channel-1: %d" %raw_adc

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Send configuration command
#           0x30(48)Continuous conversion mode, Channel-2, 12-bit Resolution
bus.write_byte(0x68, 0x30)

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Read data back from 0x00(0), 2 bytes
# raw_adc MSB, raw_adc LSB
data = bus.read_i2c_block_data(0x68, 0x00, 2)

# Convert the data to 12-bits
raw_adc = (data[0] & 0x0F) * 256 + data[1]
if raw_adc > 2047 :
    raw_adc -= 4095

# Output data to screen
```

```
print "Digital value of Analog Input on Channel-2: %d" %raw_adc

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Send configuration command
#           0x50(80)Continuous conversion mode, Channel-3, 12-bit Resolution
bus.write_byte(0x68, 0x50)

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Read data back from 0x00(0), 2 bytes
# raw_adc MSB, raw_adc LSB
data = bus.read_i2c_block_data(0x68, 0x00, 2)

# Convert the data to 12-bits
raw_adc = (data[0] & 0x0F) * 256 + data[1]
if raw_adc > 2047 :
    raw_adc -= 4095

# Output data to screen
print "Digital value of Analog Input on Channel-3: %d" %raw_adc

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Send configuration command
#           0x70(112)          Continuous conversion mode, Channel-4, 12-bit
Resolution
bus.write_byte(0x68, 0x70)

# MCP3428 address, 0x68(104)
# Read data back from 0x00(0), 2 bytes
# raw_adc MSB, raw_adc LSB
data = bus.read_i2c_block_data(0x68, 0x00, 2)

# Convert the data to 12-bits
raw_adc = (data[0] & 0x0F) * 256 + data[1]
if raw_adc > 2047 :
    raw_adc -= 4095

# Output data to screen
print "Digital value of Analog Input on Channel-4: %d" %raw_adc
```